

第一章 簡介

1.1 動態行為(dynamic behavior)的重要性

環境會隨著時間而改變，人類生存的環境本質上也是變動的，所以研究其物質或人類的動態行為現象，是一個相當重要的課題。動態行為的研究範圍領域相當廣泛，可應用於生命科學領域：如癌細胞、神經細胞的生成與發展。也可應用於醫療方面：如心臟病的診療、心電圖的研判與分析、糖尿病治療、胰島素注射治療、心血管疾病、血栓或堵塞等方面的應用。在醫學研究方面：如生物分子細胞、凝態及奈米體系表面吸附蛋白分子結構等研究。在土木工程應用方面：如河床加深、橋樑 3D 動態、水文、高樓結構抗風等方面。在金融方面：如風險控管、短期利率研究、市場價格波動、利率和股票交易波動等研究。在工程方面：如工程技術控制系統的應用、電磁波動態行為在癌症熱療行為上的研究、合成人工神經電路等領域。在經濟方面：如失業率的應用研究、進出口的研究等。在光電方面：如液晶分子的研究領域等。動態行為情境，表現在日常生活中比比皆是，可見其重要性。

混亂無序或稱為渾沌(chaos)的特性：這種 chaos 是一種非周期性信號，是屬於非線性動力學(nonlinear dynamics)，此 chaos 信號對初始條件極為敏感；也就是說一個小小的初始條件的差異，就可以影響系統的長期變化。例如天氣(氣象)系統。天氣系統是對初始條件非常敏感的，無論風速、

地形、溫度、水氣還有其他等氣象因素，這些因素的初始條件，在剛開始時，有一點點的差異不同，則蘊釀未來天氣的變化將會產生極大的變化。這種非線性混亂無序的信號，蘊藏著極豐富的訊息，科學家們運用這種渾沌訊號做科學化的研究分析，並探討其初始變化到後期的結果。

在應用方面：非周期性信號處理分析，可被廣泛的應用於氣象、醫療、物理、通訊、測量、精密加工、經濟等學科領域中。

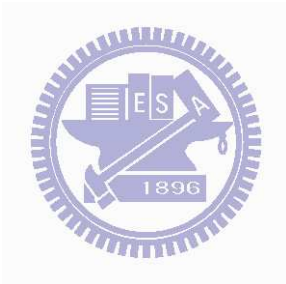
1.2 研究動機

探討雷射光在雷射共振腔內的物理特性及工程上的應用，在物理特性方面，由於在共振腔內雷射晶體(laser crystal)或稱為增益介質(gain medium)和輸出耦合鏡(output coupler)的相互作用或互相干擾(干涉)，而造成雷射光輸出信號很不平整。在此之前，由於示波器(oscilloscope)的取樣頻率(sampling rate)沒那麼好，頻率在 500MHz，偵測到的輸出信號是一直線，是典型的連續波(continuous wave: CW)信號。也就是說，輸出信號是一條橫線，這條輸出橫線與時間軸相互平行。如圖 1-1 所示，連續波(continuous wave: CW)信號。但是現在示波器的取樣頻率比先前進步許多。最近實驗室購置一部新的示波器，頻率在 40GHz，試著用 40GHz 的示波器量測過去被認是 CW 輸出的時域(time domain)信號，但實際測得是下波動不平整的輸出信號，如圖 1-2 所示。為了瞭解此上下波動現象，所以做此雷射腔

內動態實驗。

1.3 本文組織

本文共有五個章節，第一章：簡介，概略介紹 chaos 的重要性及動態行為的應用領域。第二章：說明一般雷射系統，雷射共振腔的結構，如平行平面共振腔的結構和緊密式共振腔的結構，和 etalon 光學元件的功用，以及在雷射腔內產生縱模與橫模的過程。第三章：介紹 Otsuka 的實驗架構及產生的 quasiperiodic pulsations 輸出與耦合空間分佈局部模態的雷射模型等優劣點。第四章：則是經各種實驗所觀察的結果，從混亂無序到類似周期性弛張振盪的實驗結果。第五章：結論與未來工作展望。



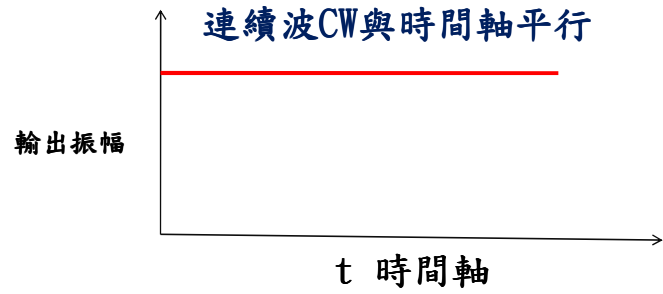


圖1-1 CW(continuous wave)輸出

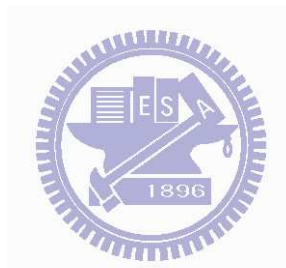


圖1-2 CW(continuous wave)輸出
用高解析度40GHz 示波器量測

第二章 雷射共振腔

2.1 簡介

一般雷射系統，如圖 2-1 所示主要由雷射二極體(Laser Diode: LD)、傳輸光纖、光學共振器(optical resonator)及增益介質(gain medium)所組成。雷射二極體產生 808nm 波長的激勵光源(pumping source)，再經由光纖(fiber)傳輸到 1:1 光束擴束器上(beam expander)，使光源能平行均勻地擴散前進，穿透過輸入耦合鏡，最後 pumping 到雷射晶體的末端表面上。是此種激勵方式稱為末端激勵(end-pumping)又稱為縱向激勵(longitudinal pumping)。一般 pumping 的方式有兩種：一是 side pumping。其結構示意圖，如圖 2-2 所示。使用 side pumping 的優點是，能產生較高的輸出功率。缺點是橫模品質較差。為了改善較差的橫模品質，所以採用 end-pumping 方式。末端激勵的雷射系統如圖 2-3 所示。End-pumping 提供了很穩定的橫模及穩定性。

增益介質若為固態晶體，則稱為固態雷射(solid-state lasers)，近數十年來，由於製程及材料技術突飛猛進，被廣泛的運用在雷射上；如 Nd:YAG、Nd:YVO₄ 等雷射晶體。固態雷射非常適合用末端激勵的方式，是利用 LD 雷射二極體發射出激勵光源，將光源穿透過輸入耦合鏡(input coupler)且 pumping 到光學共振腔內的增益介質上。雷射二極體出光當做激勵光源，其譜線線寬較窄，中心波長恰巧位於固態晶體之吸收光譜線內，可以有效地激發固態雷射晶體。當激勵光源激勵在雷射晶體(增益介質)時，雷射晶體會產生熱，此時雷射晶體須要冷卻，故晶體外側包裹著一層銦片(Indium)及銅塊散熱導槽(heat sink)，外部通以冷卻水，以保持晶體恆溫運作，以獲得穩定的模態輸出。end-pumping 提供了非常好的橫向模態品質和高的輸出穩定性。

典型的光學共振腔，是由兩片反射鏡(mirrors)所組成。M1 反射鏡(或稱為輸入耦合鏡)和 M2 反射鏡(或稱為輸出耦合鏡)所組合而成。依功能及特性可做多種組合；如 M1、M2 都是平行平面鏡所組成，稱為平行平面共振腔(plane-parallel cavity)，或稱為法布里-珀羅共振器(Fabry-Perot resonator)，如圖 2-4(左)所示。採用平行平面共振腔主要目的是在形成耦合腔結構(coupled cavity construction)。而且對準是一個較大課題，若對準稍有偏離，則雷射光會偏折出腔外。若 M1、M2 都是球面鏡所組成，則稱為球面共振腔(spherical cavity)，如圖 2-4(中)所示。若採用球面共振腔就不會造成耦合腔結構，而且最容易對準和有最小的繞射損失。此外還有一種為目前最常使用的是平凹共振腔，因為很穩定，所以也很受歡迎。其架構如圖 2-4(右)所示。另外還有一種是緊密式耦合共振腔(closely coupled cavity)，因為結構非常簡單，是由兩個光學元件所組成；雷射晶體和輸出耦合鏡所組成，如圖 2-5 所示，緊密式耦合共振腔結構。而本篇所做的實驗都是運用緊密式耦合共振腔來產生渾沌信號，並更換楔形晶體及楔形輸出耦合鏡的組合，最後獲得近似於 mode-locked 的輸出信號。光學共振腔將直接影響雷射模態；如橫向模態(與空間關聯)會影響光點大小(spot size)、發散角(divergence angle)和最大輸出功率。縱向模態(與頻率關聯)將會影響雷射輸出的單色性。光學共振腔內有兩種振盪模態：橫向模態(transverse mode)和縱向模態(longitudinal mode)。以下將介紹縱模與橫模之形成及共振腔與縱模的關係。

2.2 縱模(longitudinal mode)

光學共振腔內可同時存在許多模態，而這些模態就是光束沿著光軸來回往返於兩塊平行平面反射鏡間的進行波(traveling wave)，相互疊加所造成的。光學共振腔內的模態可分為橫模與縱模。而光波在光學共振腔內往返來回振盪，光束在光腔內往返一周，其相位必須是 2π 的整數倍。而在腔內形成一定模式的駐波(standing waves)，而這駐波指的就是縱模。駐波的圖形如圖 2-6(上)所示。一般而言，縱模是由許多個頻率所組成，且各個頻率不同而已，像梳子狀排列整齊，如圖 2-6(下)所示。縱模的形成與共振腔長(cavity length)有很大的關連。以下就以平行平面共振腔結構，來說明縱模頻率的產生。



2-2-1 平行平面共振腔結構

平行平面共振腔結構，如圖 2-1 所示，是由兩片極平整的反射鏡(mirrors)所組成，或稱為法布里-珀羅共振腔(Fabry-Perot resonator)。也稱為法布里-珀羅干涉儀(Fabry-Perot interferometer)。若將一增益介質放入於兩片反射鏡之間，並藉由雷射二極體發出的激發光源，穿透過 M1 輸入耦合鏡 pumping 到增益介質上。此時在增益介質內產生受激發射(stimulated emission)，光子經過增益介質內而產生放大作用，此光束沿著光軸(optical axis)經不斷的往返於 M1 輸入耦合鏡、增益介質和 M2 輸出耦合鏡間來回振盪，振盪的產生需要正回受(positive feedback)，當光波往返時間是光波振盪週期的整數倍時，則產生振盪現象，也就是說產生駐波。此駐波就是縱模頻率。如圖 2-6(下)所示。波峰與波峰之間距稱為自由光譜

範圍(Free Spectral Range : FSR)。

兩個縱模間的頻率是 $\Delta f = \frac{c}{2nL} = \text{FSR}$ 。是雷射共振腔的縱模頻率，也就是光波在共振腔所產生的駐波。

$$\text{縱模的頻率 } f_q = q \times \frac{c}{2L}$$

縱模的頻率 f_q

整數 q 1, 2, 3...

腔長 L



設 M1 輸入鏡與 M2 輸出鏡之分開距離為 L ，腔長改變將影響雷射光之共振頻率。 $\Delta f = \frac{c}{2nL}$ ，腔長變短、頻率變高。如圖 2-6 所示，兩個縱模間的

$$\text{頻率 } \Delta f = \frac{c}{2nL}$$

Δf ：分隔之頻率(frequency separation)

c ：光速 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

n ：增益介質之折射率

L ：M1 與 M2 間之距離

縱模(縱向模態)會影響單色性，縱向模態數愈少，則雷射輸出之單色性愈佳。可以運用工程技術來達到單縱模運作；如模態選擇等技術。

雷射晶體(或稱增益介質)內的增益曲線，如圖 2-7 所示，會同時存在著許多縱模，而這些縱模在共振腔內彼此間都沒有相位的關係，且振幅均不相等，因此這些縱模就沒有干涉現象產生。如果採用鎖模(mode-locked)技術，將這些縱模的相位(phases)給鎖定住，則一個縱模與另一個縱模間就會有一定的相位差，而這些縱模就會產生多重光束的干涉現象，且有確定的相位差。如此就可再經過壓縮雷射脈衝寬度，而達到 10^{-12} 秒的脈衝寬度，且可提高峰值功率，而達到百萬瓦特(megawatt: MW)的等級。

平行平面共振腔(plane-parallel resonator)結構，亦可稱為介穩腔(marginally stable resonator)，是由兩片非常平整的平行平面反射鏡所組成，故校直(collimation)較難，光束稍有偏差，則腔內之光束將會偏離出腔外，造成耗損，是其缺點。下列則介紹緊密式耦合共振腔。



2-2-2 緊密式耦合共振腔(closely coupled cavity)

本實驗均採用緊密式耦合共振腔結構，是由一個 Nd:YVO₄ 晶體和一片輸出耦合鏡所組成的雷射光學共振腔。結構如圖 2-5 所示。雷射晶體 Nd:YVO₄ 的一端(入射面)，鍍上一層可穿透 808nm 波長光源的高穿透膜(HT coating)，和一層對 1064nm 波長光束的高反射膜(HR coating)。輸出耦合鏡是一片非常平整的平面鏡，一端面(入射面)鍍上一層高反射膜，可反射 1064nm 波長的光束。用雷射二極體發射出 808nm 波長的光源，直接 pumping 到雷射晶體 Nd:YVO₄ 的入射端面，使雷射晶體產生居量反轉，光子在腔內沿著光軸往返來回振盪，將光放大，而產生光束，最後穿透輸出耦合鏡射出雷射光。它的優

點是不需要另一片輸入耦合鏡，可減少一個光學元件，更可縮小腔結構。由於共振腔距離較長，在腔內亦可放置其他光學元件，以改變其功能，增加應用價值。如放置倍頻晶體，改變輸出波長進而改變其輸出光顏色。或是放入 etalon 元件，以獲得單縱模操作等等。

2-2-3 法布里-珀羅標準具(Fabry-Perot etalon)

法布里-珀羅標準具，或稱為法布里-珀羅選頻元件，又可稱為法布里-珀羅干涉儀(Fabry-Perot Interferometer)，簡稱 etalon，如圖 2-8 所示 etalon 示意圖。etalon 是一片透明的平行平面玻璃或石英材料所做成，且熱膨脹係數很小所構成。若放置於共振腔內時，並傾斜一角度，如此可以選擇所要的頻率，當做頻率濾波器(frequency filter)或選頻元件來使用。亦可當作輸出耦合鏡來使用(只要在透鏡的入射面蒸鍍上一層高反射膜 (high reflection coating : HR)即可)。若使用兩片各自獨立的標準具，一片做為輸入耦合鏡，另一片做為輸出耦合鏡，且距離固定，則所架構的共振腔稱為法布里-珀羅共振腔(Fabry-Perot resonator)。

最簡單的選頻元件 (etalon)，是一片沒有鍍膜的平行平面、固態透明板，光束的穿透(transmission)或反射(reflection)，完全由標準具的厚度 L_e 和材質的折射率(index of refraction)所決定。如圖 2-8 所示，最簡單的選頻元件 (etalon)示意圖。

在電信通訊輸配應用中，可作為精確的波長(頻率)標準參考(wavelength references)。若使用在雷射系統中，可形成基本的波長鎖定系統(wavelength-locking system)，可穩定雷射的波長。etalon 的結構和光束多重反射及穿透的示意圖，如圖 2-9 所示。此種沒有鍍膜的 etalon，一般都放置在共振腔內，有時刻意傾斜一個角度，以便可選擇所要的頻率，所以 etalon 又稱選頻元件，其結構如圖 2-10 所示，裝置在腔內的 etalon 示意圖。由於在共振腔內同時存在多重縱模，如圖 2-11 圖(左)所示多重縱模分佈圖，若在腔內傾斜放置一片 etalon，則可挑出所要的單一頻率，可選出單一縱模，如圖 2-11(右)所示。經由 etalon 所選出的單一縱模圖。腔內放置一片傾斜的 etalon 主要目的在破壞耦合共振腔(coupled cavity)效應，避免造成耦合共振腔所引起的振動干擾，如圖 2-10 所示。

當 etalon 兩端面分別蒸鍍上不同的膜層時，就會有不同的功能，etalon 的形態如圖 2-12 所示。若標準具在入射端面 M1 鍍上一層高反射率的膜(HR coating)對 1064nm 波長和高穿透的膜(HT coating)對 808nm 波長時，則此時標準具當作一個輸入耦合鏡來使用，如圖 2-12(b)所示，若標準具在入射面 M2 鍍上一層高反射率的膜層(coating)對 1064nm 波長，則此時標準具當作一個輸出鏡來使用，如圖 2-12(c)所示，而在標準具的 M1 的背面有反射光時，則將會產生附屬的脈衝頻率(satellite pulses)，而這附屬的脈衝頻率將與共振腔內的頻率互相干擾，引起不必要的干涉。為了因反射頻率而

造成的干涉，則在 M2 面鍍上一層抗反射膜(antireflection coating: AR)，以消除因反射時所造成的干涉。如圖 2-12(c)所示。M2 面鍍上一層抗反射膜，最主要的目的是不要產生法布里-珀羅效應(Fabry-Perot effect)。

在反射面 M1 蒸鍍一層高反射膜，當入射光射入時，會與背面的反射光造成不必要的附屬的脈衝頻率，而與腔內互相干擾，引起不必要的干涉，所以在背面(M2 端面)鍍上一層抗反射膜。雖然鍍上抗反射膜，但由於反射光不會完全消失為零，仍會造成微量的附屬脈衝頻率問題，此時可將 M2 面磨去一小角度，稱為楔形輸出耦合鏡 (wedge-cut output coupler)，可使背面的反射光束偏向，使附屬的脈衝頻率與主光束分離，而不要與共振腔內的信號相互干擾。楔形輸出耦合鏡如圖 2-12(d)所示。

在雷射系統應用中，Fabry-Perot etalon 放置於共振腔中，可當做一個頻率濾波器或選頻元件來使用，有時亦可將標準具傾斜一角度，以挑選所選擇的頻率。為了消除 etalon 標準具上的反射光干擾，可藉由磨去一小角度的 etalon 當輸出耦合鏡。本實驗就是利用楔形的輸出鏡，來抑制反射光與其他共振腔所產生的信號相互干擾。也就是利用楔形輸出耦合鏡當做一個 etalon 來消除後段面所生成的干擾頻率。

這片 etalon 能使光束在這平行-平板(plane-parallel plate)間做多重反射(multiple reflections)及多重透射並來回振盪，造成周期性波長的穿透與反射，造成與腔內的頻率干涉。

2-3 橫模(transverse mode)

雷射光是電磁波，是由電場與磁場所構成的橫向波，如圖 2-13 所示。

雷射的模態一般指的是橫模又稱為空間模態；或稱橫向模態，是指電場在空間位置的分佈情形，也就是雷射光束橫截面上電場的分佈。以橫向電磁波(Transverse Electromagnetic wave)TEM_{mn} 表示。由於波傳播是電磁場變化的現象，因為電場變化快速，是光強度隨著空間位置變化，可以用電場振幅分佈及光強度分佈來描述橫向模態。橫向模態最低階的模態是 TEM₀₀ 模態，也稱為基模，其強度是呈高斯分佈，所以 TEM₀₀ 光束亦稱為高斯光束。高斯光束的示意圖如圖 2-14 所示。

有兩套方式去解析橫向高階模態；一是圓形的橫向幾何形狀，用拉蓋爾多項式(Laguerre polynomial function)來表示，一般以圓柱座標表示，如圖 2-15 所示。另一表示方式是方形橫向幾何形態，以 Hermite polynomial function 表達。一般以直角座標表示，如圖 2-16 所示。以下所討論的是以 Hermite Gaussian beams 為主，Hermite Gaussian modes 圖案所呈現外觀排列形狀為方形雷射橫向模。一般雷射的模式指的是橫模，是指雷射光束橫截面上電場的分佈。

橫向模態：會影響光斑大小(spot size)、發散角(divergence angle)和最大輸出功率。在共振腔內的光波，以及共振腔穿透輸出耦合鏡的雷射光束是屬於高斯光束(Gaussian beams)，所以雷射光是用高斯光束來描述。

雷射光束的輸出點被稱為橫向電磁模 $TEM_{x,y}$ 。藉由雷射二極體光源，其光波長 λ ，pumping 在 $Nd:YVO_4$ 晶體的末端處， $Nd:YVO_4$ 晶體對 808nm 光源波長吸收率最大。光束擴束器主要的功能是将 pumping 光源的光束擴大，同時也將光束的發散角壓縮，而達到壓縮發散角的目的。藉由壓縮光束的發散角，可以改善 TEM_{00} 模態的方向性。Pumping 的位置不同，則增益結構(gain structure)分佈亦不同。

隨著 pumping 位置的位移，往橫向偏移，既往 Y 軸方向偏移，也就是所稱的離軸(off-axis)。隨著 pumping 離光軸愈遠，則模數的階數就愈高：如 TEM_{00} 、 TEM_{10} 、 TEM_{01} 、 TEM_{20} 、 TEM_{11} 、 TEM_{02} 、 TEM_{21} 、 TEM_{22} 、 TEM_{12} 、 TEM_{33} 等高階模態，離軸 pumping 就是增強那個 $TEM_{x,y}$ 的模態。如圖 2-16 所示，不同的高階橫模圖案。



橫向模(橫模)的特性

雷射光束的輸出點被稱為橫向電磁模 TEM 。雷射的特性由 TEM 模態來決定。一般商用雷射的應用，都使用橫向電磁模 TEM_{00} 模態，是一個圓形模且外型是高斯分佈，具有聚焦高能量的光束，應用在雷射焊接，遠距測量上。

雷射的發散角與雷射的指向性有很大的關聯，發散角愈小則雷射光束的指向性愈佳。共振腔型態的選擇也會影響發散角。對穩定腔而言：曲率半徑 R 愈大則發散角愈小。

高斯光束的特性：光腰半徑 w_0 愈大，光束發散角(divergence angle)

愈小，準直性就好。反之，光腰半徑愈小，光束發散角愈大，則光束聚焦性就好。波長 λ 越短，則遠場發散角越小。故在長距離光通信中，採用短波長的高斯光束是有利的。

光學共振腔內(optical resonator)往返來回的振盪，在雷射晶體與輸出鏡間之幾何結構及分開之距離(L)，對雷射光之空間特性和時域(time domain)特性，有極大的影響。增益介質(或稱雷射晶體)和輸出耦合鏡之幾何結構，將影響雷射光之輸出橫向模態(transverse mode)。如橫向模態之最低階為 TEM_{00} ；(Transverse Electromagnetic Wave；TEM 橫向電磁波)。 TEM_{00} 光束又稱為高斯光束(Gaussian beam)，又稱為單相模態(uniphase mode)，能讓雷射光在空間上聚集成一圓點。當雷射光在離軸的(off-axis)方向振盪時，則會形成高階的橫向模態。

在多重橫向模態運作下，多重模態圖形如圖 2-17 所示，研究得最廣也最多的是 Otsuka 團隊，下一章介紹 Otsuka 所提出耦合空間分佈局部模態的雷射模型的概念，運用簡單的 microchip cavity 結構，利用熱透鏡效應及 asymmetric pumping 方式，獲得 chaotic 和 quasiperiodic relaxation oscillations 的輸出圖案。

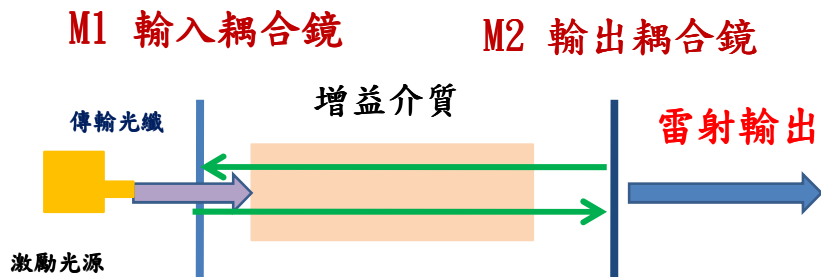


圖2-1 雷射系統

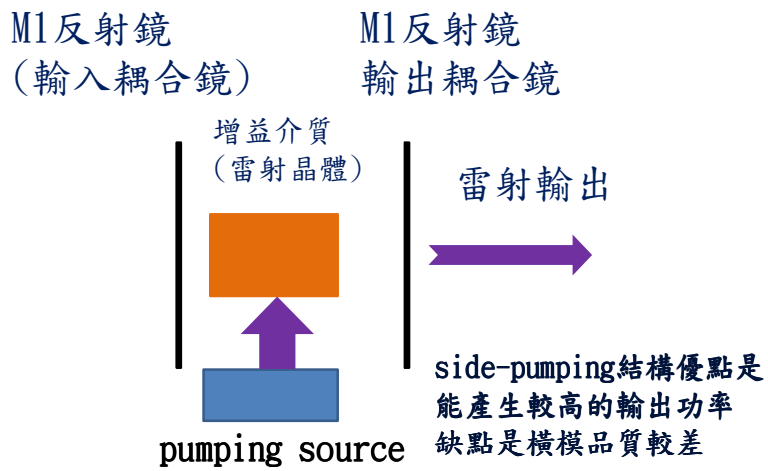
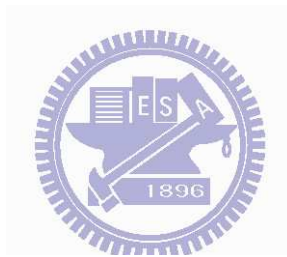


圖2-2 side-pumping結構

由M1、M2兩片反射鏡所組成的光學共振器(平行平面共振腔)

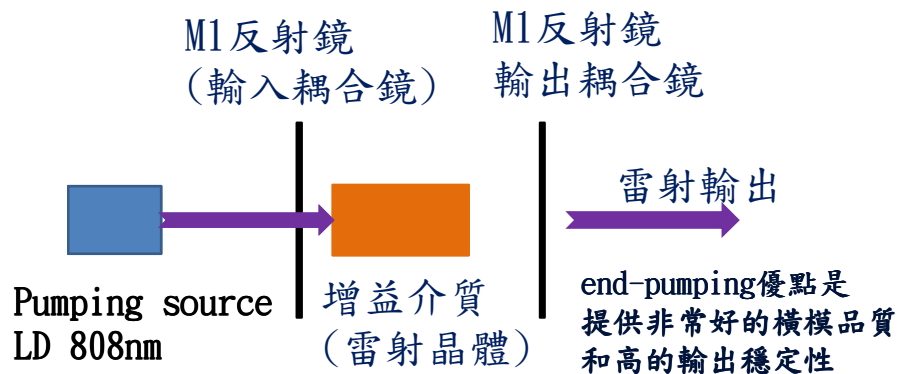
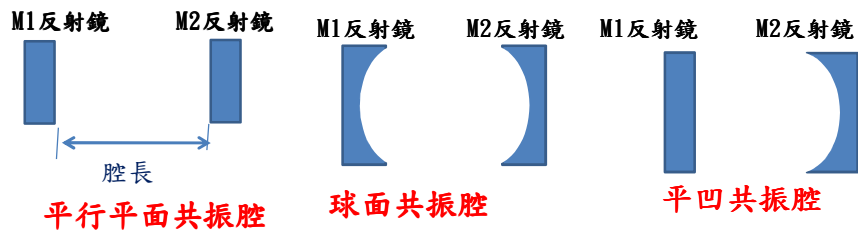


圖2-3 end-pumping 結構

由M1、M2兩片反射鏡所組成的光學共振器(平行平面共振腔)



由M1、M2兩片反射鏡所組成的光學共振器



對準是重要的課題
若對不準容易造成光
偏折出腔外

最容易對準
有最小的繞射損失

一般較常使用
因為最穩定
所以最受歡迎

共振腔型態 圖2-4(左)平行平面共振腔
圖2-4(中)球面共振腔
圖2-4(右)平凹共振腔

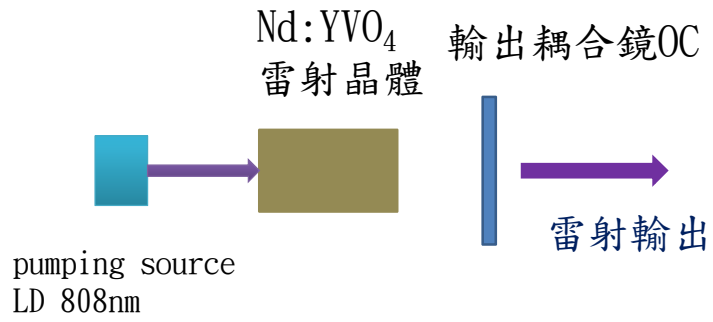


圖2-5 緊密式共振腔
(由雷射晶體與輸出耦合鏡所組成)

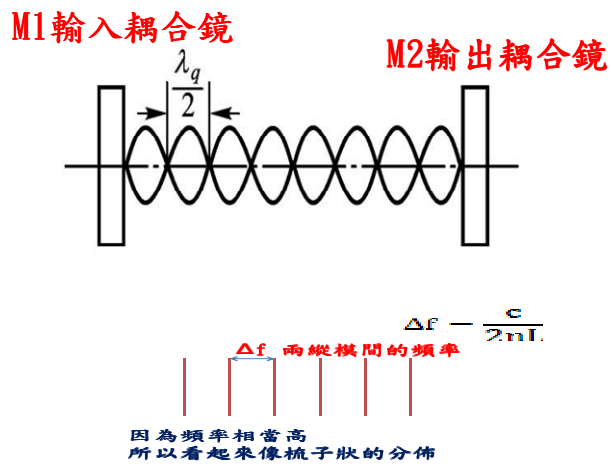
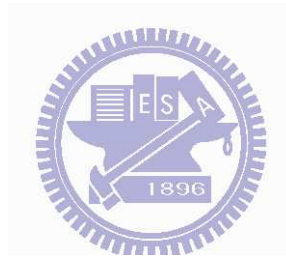
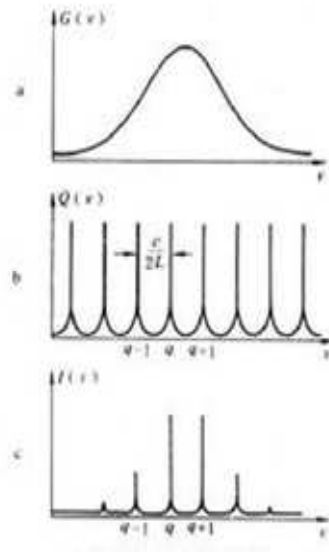


圖2-6(下) 像梳子狀的縱模

圖2-6 駐波(縱模) (上)圖 駐波(也就是縱模)
(下)圖 像梳子狀排列的縱模



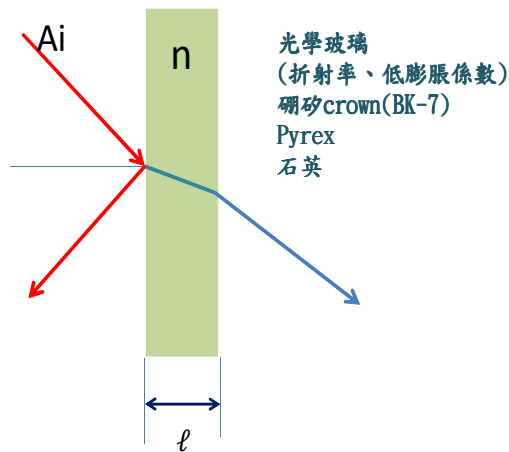
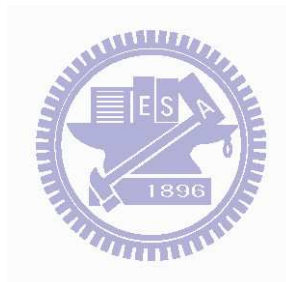
雷射的躍遷線寬

共振腔內縱模

雷射增益曲線
與縱模疊加的輸出曲線

縱模(縱向模態)會影響單色性，縱向模態數愈少，則雷射輸出之單色性愈佳。

圖2-7 雷射增益曲線



Fabry-perot etalon：多重反射模型

圖2-8 etalon示意圖

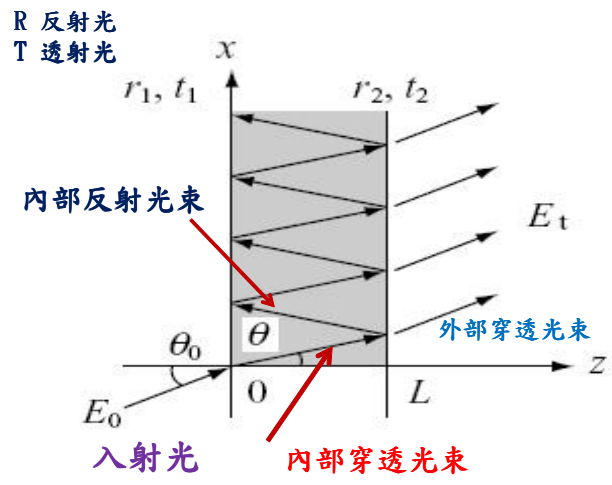


圖2-9 光在法布里-珀羅共振腔內傳遞示意圖

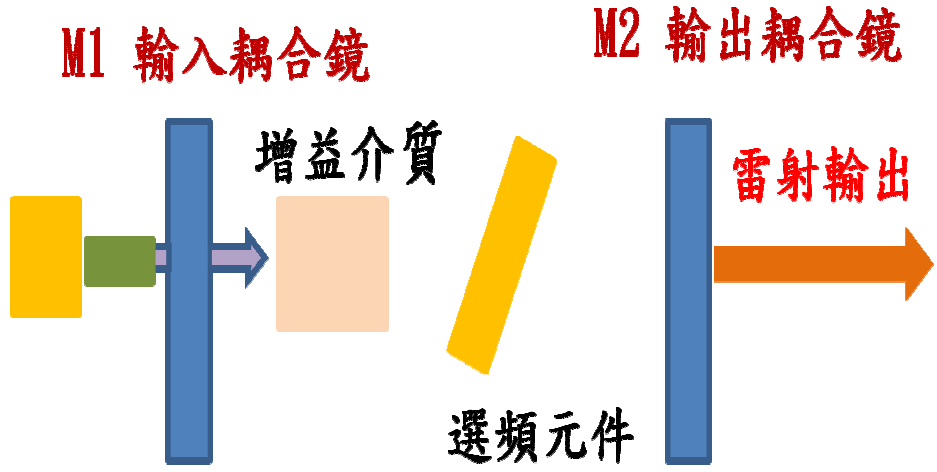
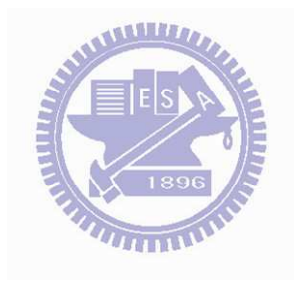


圖 2-10 裝置在腔內的 etalon 示意圖

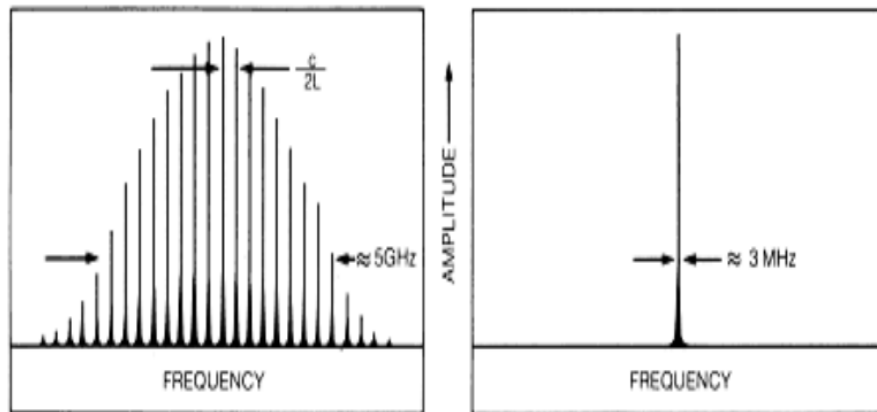
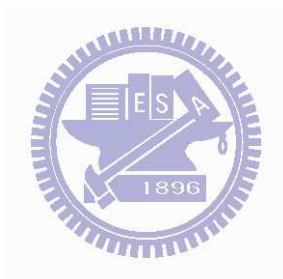


圖2-11 多重縱模分佈與單縱模輸出
 11(左)圖 多重縱模分佈
 11(右)圖 使用選頻元件的單縱模(或單頻)輸出



(a)石英或玻璃
 做選頻元件用
 置於共振腔內
 或傾斜一角度目的在
 避免造成耦合共振腔
 引起的振盪

(c)第一鏡面鍍上高反射膜
 第二鏡面鍍上抗反射膜
 抑制Fabry-Perot etalon效應



(b)做輸出/輸入耦合器用
 輸出耦合器鍍上高反射膜
 輸入耦合器鍍上高反射膜和高穿透膜
 (讓808nm光束穿透, 1064nm光束反射)

(d)Wedge-cut etalon
 由於鍍上抗反射膜
 仍無法消除其餘雜訊
 故將etalon切去一角
 以消除雜訊

圖2-12 etalon型態(a)選頻元件 (b)輸出耦合鏡
 (c)AR coating 的 etalon (d)wedge-cut etalon

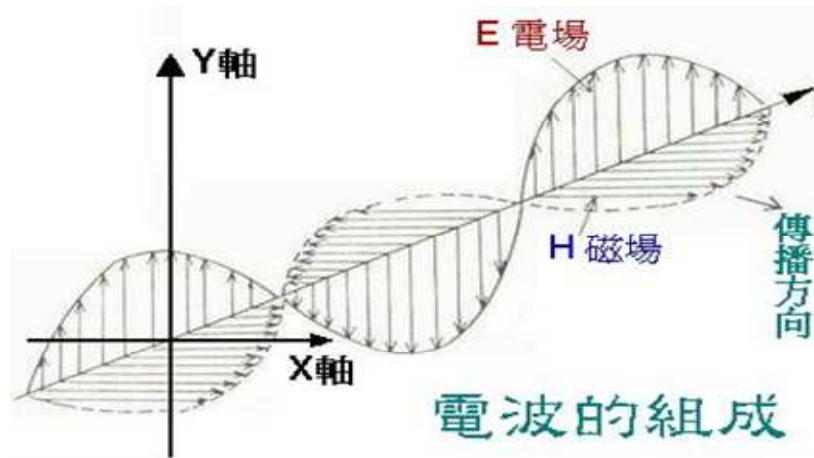


圖2-13 光是電磁波 由電場與磁場所構成

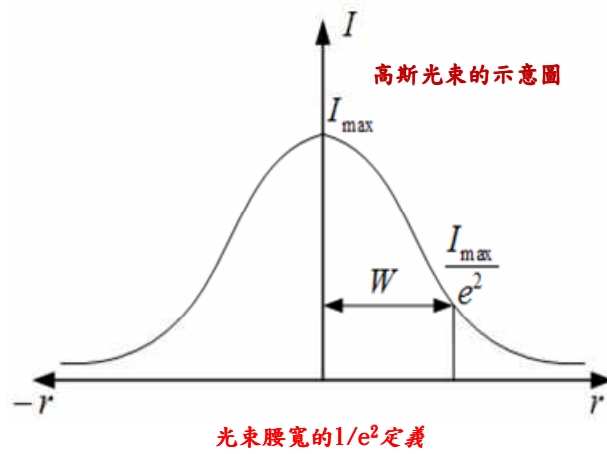


圖2-14 高斯光束的示意圖

Cylindrical coordinates \rightarrow Laguerre-Gaussian modes (LG modes)

拉蓋爾高斯模態(徑向(圓圈), 角向(直線))

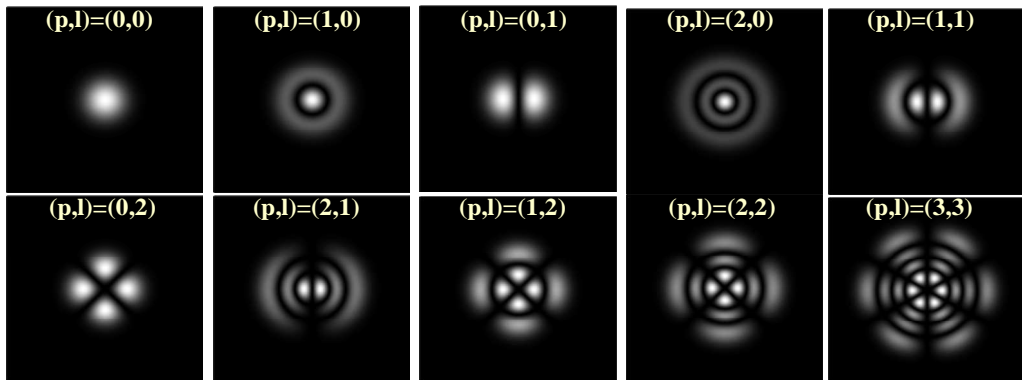


圖2-15 圓柱座標描述 在光學共振腔的橫向模態

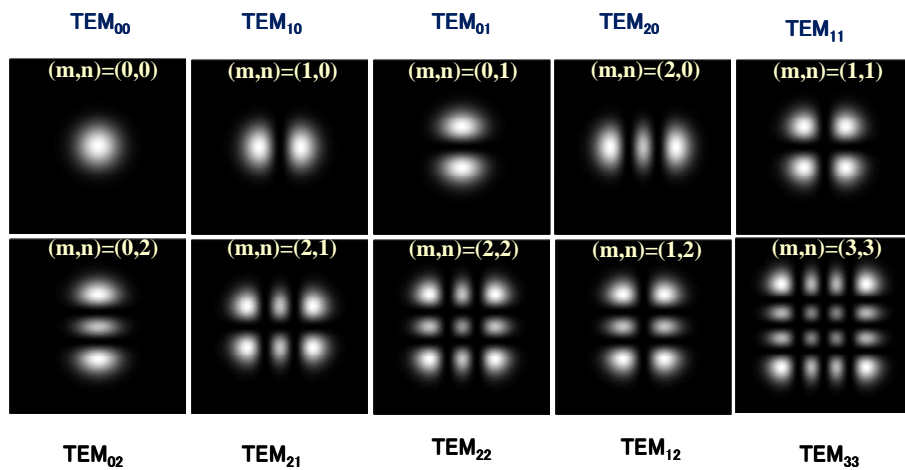


圖2-16 直角座標描述 在光學共振腔的橫向模態

Rectangular coordinates \rightarrow Hermite-Gaussian modes (HG modes)

Multitransverse mode laser

有不同的頻率就會有交互作用而造成dynamic變化

Otsuka研究最多最廣。

是利用橫模與橫模之交互作用及熱透鏡效應與離軸 pumping，等產生動態輸出，造成multitransverse mode。

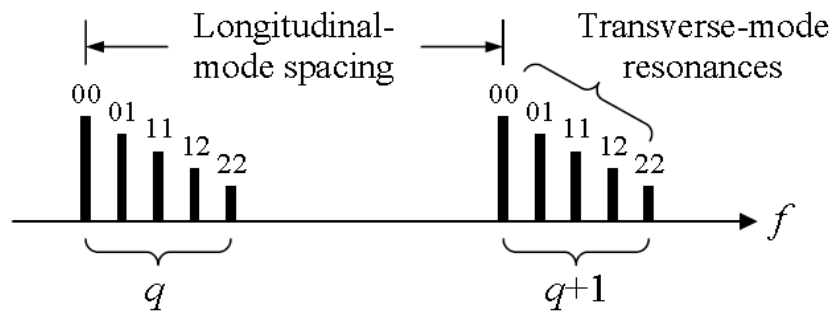


圖2-17 多重橫模



第三章 耦合空間分佈局部模態的雷射模型

3-1 背景說明

在傳統上，使用平行平面共振腔，最主要目的是拉長腔長，以確保能在單一橫模下運作，其架構如圖 3-1(上)所示。然而 Otsuka 團隊提出了一個耦合空間分佈局部模態的雷射模型(coupled local-mode laser model)概念，只使用一個光學元件做為共振器，用 Nd:YAG 陶瓷晶體做為增益介質及共振器，其目的在瞭解在雷射晶體中自我感應(self-induced)和高速調制(high-speed modulations)的現象。

經實驗證實，利用薄片 Nd:YAG 陶瓷晶體，在陶瓷晶體兩端面鍍上高反射膜，構成一個共振腔，如圖 3-1(下)所示，並用雷射二極體(LD)去激勵(pumping) Nd:YAG 陶瓷晶體的入射端，在輸出端除了可以觀察到複雜的高速調制，亦可獲得類似周期性的(quasiperiodic)弛張振盪，如圖 3-2(上)所示，和雜亂無序的弛張振盪(chaotic relaxation oscillations)，如圖 3-2(下)所示，也可產生像品質開關型態長而尖的脈衝信號(Q-switching-type spiking pulsation)。並且可以設計出簡易的數學模型(model)，利用數字模擬，再製作描繪出耦合局部模態的雷射信號，與實驗的信號相契合。

3-2 Otsuka 的實驗架構

Otsuka 使用兩種架構方式，在單一縱模運作下，去獲得不同的多重橫向模態。架構一(如圖 3-3 所示)是利用不同的釹離子濃度(1%、2%、5%)摻雜在 YAG 中，產生大小不等的 grain boundaries，進而改變輸出圖案。架構二(如圖 3-4 所示)是利用非對稱 pumping，調變功率大小，產生不同的熱透鏡效應，產生不同的輸出橫模圖案。

Otsuka 的實驗架構一，如圖 3-3 所示，是利用一片薄片微晶片 (thin-slice microchip) 固態雷射晶體，Nd:YAG 陶瓷晶體，並在其晶體的兩端面表面鍍上介質薄膜，當成介質反射鏡。使用二極體雷射做末端激勵 (end-pumping) 下，利用晶體本身的熱效應 (thermal effect)，及摻雜不等的釹離子濃度，進而產生 pulsation oscillation 等信號，成為最簡單的元件組態 (configuration) 結構。由於高反射膜直接蒸鍍在晶體兩端面，如此腔長縮短，以確保在單一縱模下運作 (mode size < pump size)，並獲得 multitransverse oscillation。

Otsuka 的架構一是使用薄片多晶矽 Nd:YAG 陶瓷晶體，比 Nd:YAG 單晶有較佳的透明度。用不同摻雜濃度的 Nd:YAG 陶瓷晶體做有系統的廣泛研究，並顯示出，如果釹離子 (Nd^{3+}) 濃度高，則在結晶表面很難保持大的顆粒尺寸，還有顆粒邊界數量將增加在相同的路徑長度下。

Otsuka 的實驗架構一，如圖 3-3 所示，使用薄片 Nd:YAG 陶瓷晶體 (thin-slice Nd:YAG ceramic crystal) 在燒結 (sintering) 的過程中，本身就具有下列特性：一、自我感應不穩定 (self-induced instabilities) 的特性。散亂分佈不均的單晶顆粒 (grains)，如圖 3-5 所示 grain boundaries 示意圖，而這些顆粒圍繞著晶軸，造成晶體有雙折性行為 (birefringence) 及失去偏極性 (depolarization) 的特性。二、相位失真 (phase distortions) 或稱相位畸變。隨著 pumping 功率的增加，相位失真會發生在橫向方向 (transverse direction)。薄片 Nd:YAG 陶瓷晶體是利用橫向 (transverse) 位置的不同，而造成輸出 pulsation oscillation 的現象。由於 Nd:YAG 陶瓷晶體在單一縱模 (longitudinal mode) 操作下，每個顆粒 (grain) 與顆粒間大小不一，所以顆粒邊界 (grain boundaries) 的大小不一樣，以致於光束可能同時激發兩個顆粒 (grains) 以上，就會有耦合 (coupling) 和拍頻

(beating)的現象產生。顆粒邊界指的是多晶矽(polycrystalline)內各個晶粒間互相鄰接的部分。

薄片的 Nd:YAG 陶瓷晶體，由散亂分佈的單結晶顆粒所組成。這些單晶顆粒的晶軸方向是被顆粒邊界所圍繞，每個顆粒是個自獨立存在的，是置放在緊密的空間反射末端表面間。因為雙折射率現象(如去偏極化 depolarization)，視晶軸顆粒方向而定，隨著幫浦功率的增加，強烈的相位失真發生在橫向方向。由於在平行平面腔內隨機相位擾動分佈的結果，Hermite-Gaussian modes 不會形成，還有這雷射圖案被分裂成多重局部地橫向模態(localized transverse modes)稱為 “局部模態”。這局部模態擁有輕微的差異頻率，導源於微量的光學腔長差異，如駐波條件。這些局部模態經過空間場疊加的耦合，遍及橫向方向。一個例子顯現在圖 3-5 中所示，一個被蝕刻的表面指示出單晶顆粒結構。

實驗架設如圖 3-3 所示，是利用顆粒邊界(grain boundaries)的大小尺寸不相同，和激勵光點(pumping spot size)的大小(遠場 far-field 和近場 near-field)，以及激勵功率(pumping power)的改變，可觀測到類似 Q 開關脈衝(Q-switching-like pulsations)雷射的自我感應脈衝振盪(self-induced pulsation oscillation)。

雷射二極體發出 808nm 的光束，是橢圓形的光點，經過歪向稜鏡對(如圖 3-6 所示)後輸出成點圓，直接激勵在 Nd:YAG 陶瓷晶體的入射端面(M1)上，在輸出端面(M2) 接上觀測儀器，可以觀測到複雜的高速調制，類似周期性

的和混亂無序的弛張振盪。如圖 3-2(a)(b)所示。

使用歪向稜鏡(Anamorphic prism pairs)最主要的功能是将橢圓形的輸入光束轉換成圓形的輸出光束，如圖 3-6 所示。雷射二極體對輸出光束是橢圓形的輸出光束，經由歪向稜鏡的轉換將橢圓形光束轉換為圓形光束。主要是利用入射光在稜鏡的斜面上，有一面較長的斜面，故有一較長的接觸面，所以可以在此橫向軸(較短的軸向)放大，而在另一長軸上保持原狀。

利用三種不同濃度的釹離子摻雜；1%Nd:YAG、2%Nd:YAG、5%Nd:YAG，可以量測得輸入-輸出之特性曲線；幫浦功率(X 軸)是 pump power(mW)，輸出功率(Y 軸)是 output power(mW)。使用顯微鏡接物鏡(microscope objective lenses)不同的放大倍率 $M=10x$ ；數值孔徑 $NA=0.25$ 和 $M=20x$ 數值孔徑 $NA=0.4$ 。實驗分組如下。




雷射晶體樣本	顯微接物鏡
1%Nd:YAG	10x (NA=0.25)
2%Nd:YAG	10x (NA=0.25)
5%Nd:YAG	10x (NA=0.25)
5%Nd:YAG	20x (NA=0.4)

不同濃度的釹離子 $1\% \text{Nd}^{3+}$ 、 $2\% \text{Nd}^{3+}$ 、 $5\% \text{Nd}^{3+}$ 各獲得不同的顆粒尺寸大小，並在相同的路徑下，將增加其顆粒邊界。雷射晶體的入射端面，在聚焦面的光斑大小，會改變晶體內部的溫度分佈，和激發功率密度。而晶體內的溫度

分佈受物鏡倍率及鏡片數值孔徑的影響。

實驗架構二，如圖 3-4 所示，使用 LNP(LiNdP₄O₁₂)磷酸鋰晶體，光斑面積 $20\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ 非對稱 pumping，如圖 3-7(左)所示，是利用熱透鏡效應及熱感應折射率分佈情形，如圖 3-7(右上)所示，獲得 chaotic spiking 振盪輸出，如圖 3-7(右下)所示。在非對稱 end-pumping 不同功率下，所產生的多重橫模，如圖 3-8 所示。在 58mW 和 80mW 激勵下所對應的光學光譜、輸出波形及射頻功率光譜，如圖 3-9 所示，pumping 功率愈大，則產生的 peak 數愈多，表示橫模數越多，如圖 3-8 所示。

3-3 結論

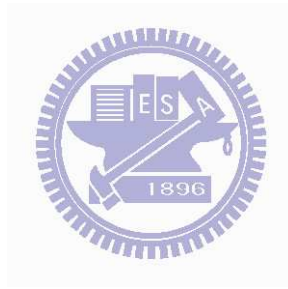


Otsuka 提出這兩篇文章，主要在探討使用一片薄片 Nd:YAG 陶瓷晶體(運用燒結法簡單製程燒製而成)，利用 LD 光束激勵 Nd:YAG 陶瓷晶體(增益介質)，以便觀察 chaotic relaxation oscillation、high-speed modulation 等輸出的動態效應。並運用數學模型，模擬出這些動態行為。此外，由於構造簡單，只運用一個燒結的 Nd:YAG 陶瓷晶體做為共振器，共振腔內沒有多餘的空間可做運用，如放置品質開關、倍頻晶體或 etalon 等光學元件，故限制其發展，是其缺點。

藉由雷射二極體 pumping 到 Nd:YAG 陶瓷晶體和 LNP(LiNdP₄O₁₂)磷酸鋰晶體的位置不同及 pumping 功率不同，可觀察到不同的周期性 spiking pulsations 信號。而這種周期性的 spiking 振盪頻率開始出現時，剛好是在臨界激勵功率之上。當 pump 功率增加時，spiking 脈衝頻率也增加。Spiking pulsations 信號與高速調制的拍頻信號同時存在。隨著激勵功率(pump power)

的減少，則 spiking oscillation frequency 將減少。

Otsuka 團隊使用 microchip cavity 的概念，在腔長變短的條件下，確定在單一縱模下運作，所觀察到各種多重橫向模態的輸出。若在單一橫模運作下，也會有這種動態行為產生嗎？以下第四章就是探討在單一橫模運作下，也會有這種動態行為產生。



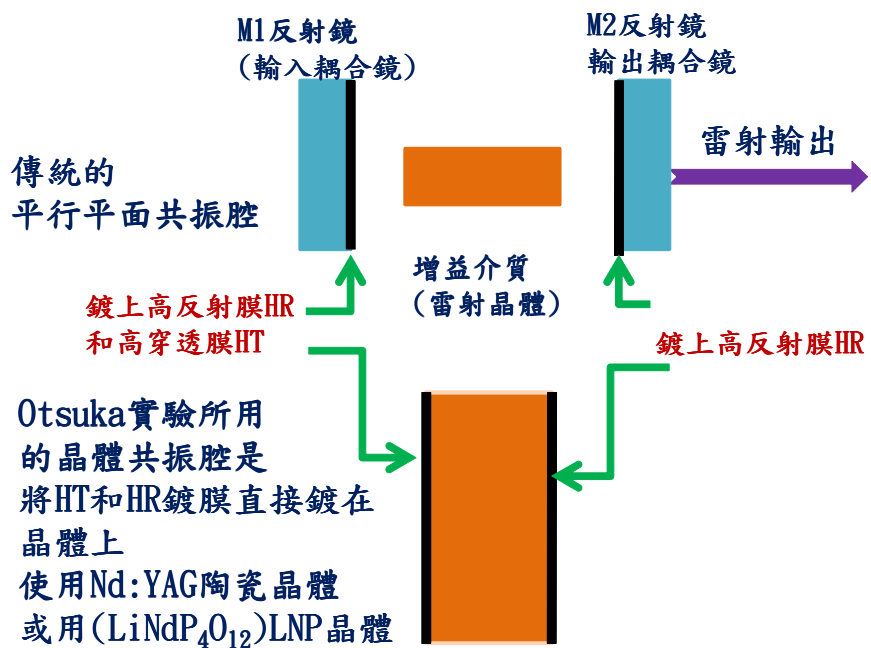


圖3-1 傳統的平行平面共振腔與Otsuka實驗所用的晶體共振腔

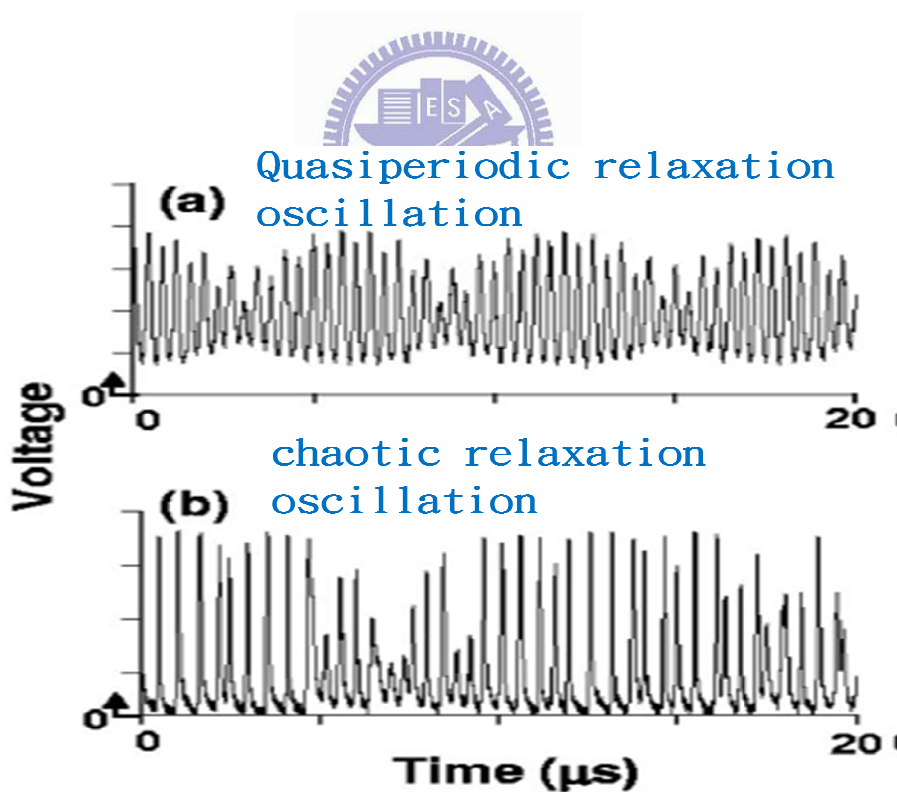


圖 3-2 relaxation oscillations (a) quasiperiodic relaxation oscillation

(b) chaotic relaxation oscillation

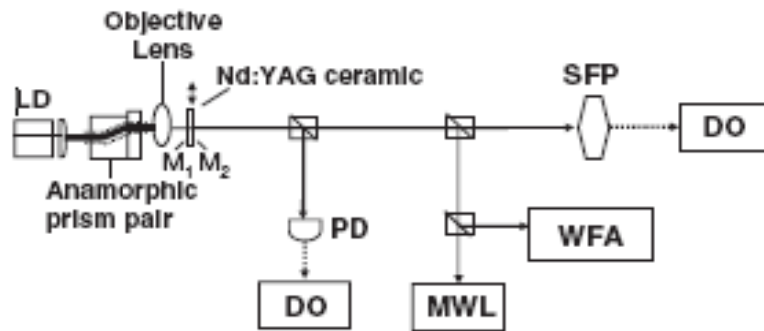


圖3-3 實驗架構一 (end-pumping)
耦合空間分佈局部模態的雷射模型

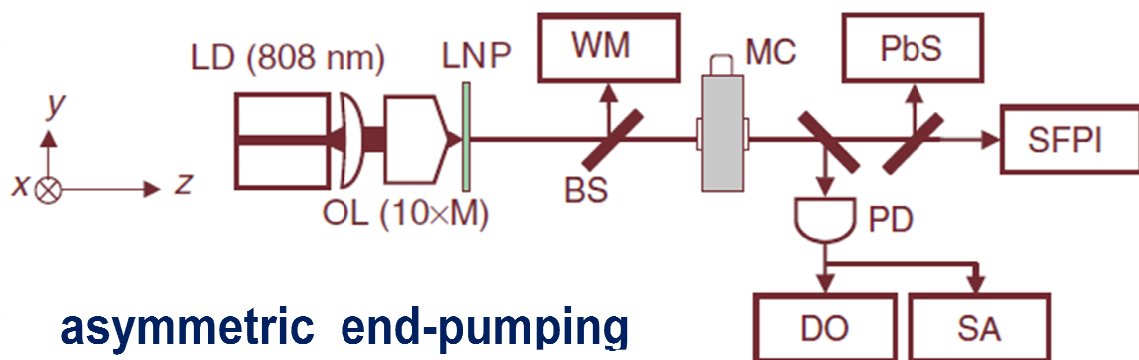


圖 3-4 實驗架構二 asymmetric end-pumping

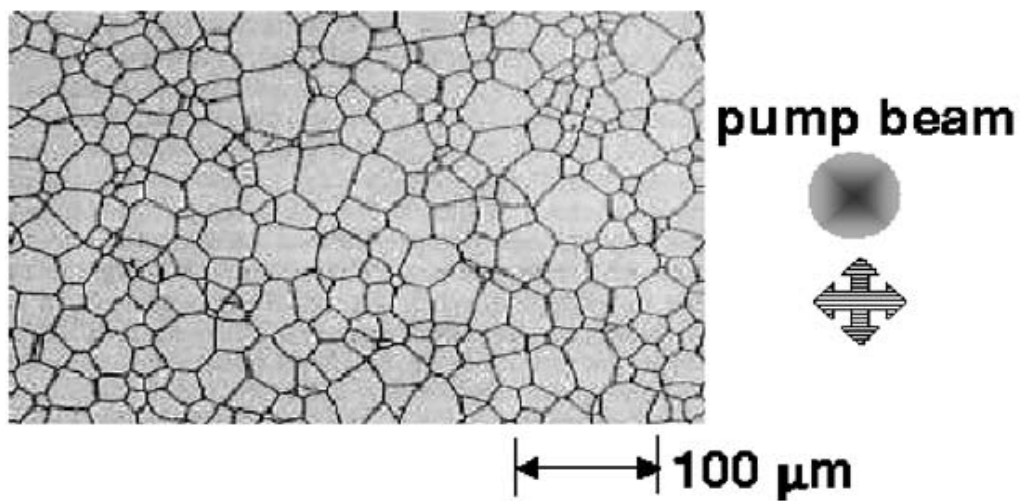


圖 3-5 grain boundaries

Nd:YAG 摻雜的鉍離子愈濃(5% Nd^{3+})則顆粒(grains)愈小

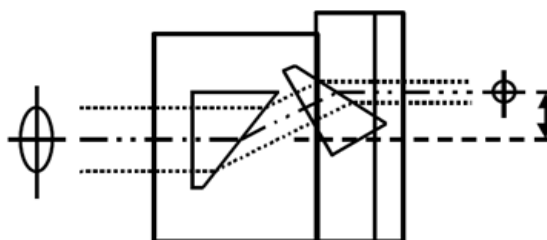
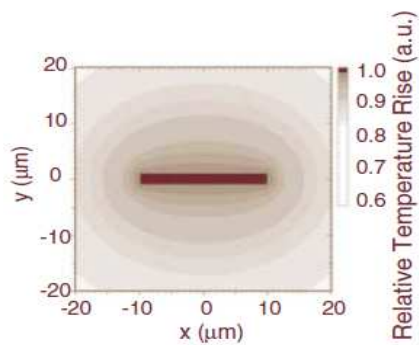
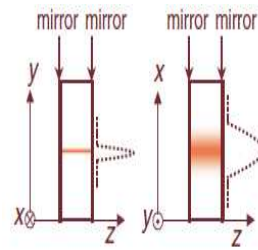


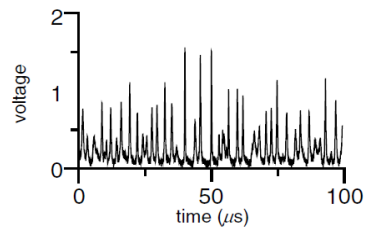
圖3-6 歪向稜鏡構造及示意圖



打在LNP($\text{LiNdP}_4\text{O}_{12}$)磷酸釷鋰晶體上
 (晶體7mm × 7mm 厚度 0.3mm)
 光斑大小 20 μm × 2 μm
 在二維象限內
 相對溫度分佈情形

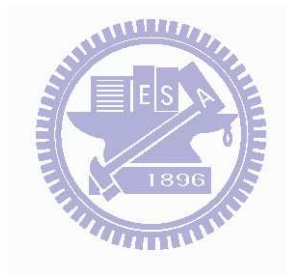


在晶體內
 熱感應折射率分佈情形



混亂無序的spiking振盪輸出信號

圖3-7 實驗架構二 asymmetric end-pumping



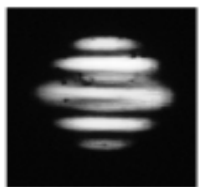
42 mW



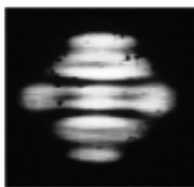
47 mW



52 mW



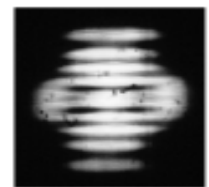
61 mW



70 mW

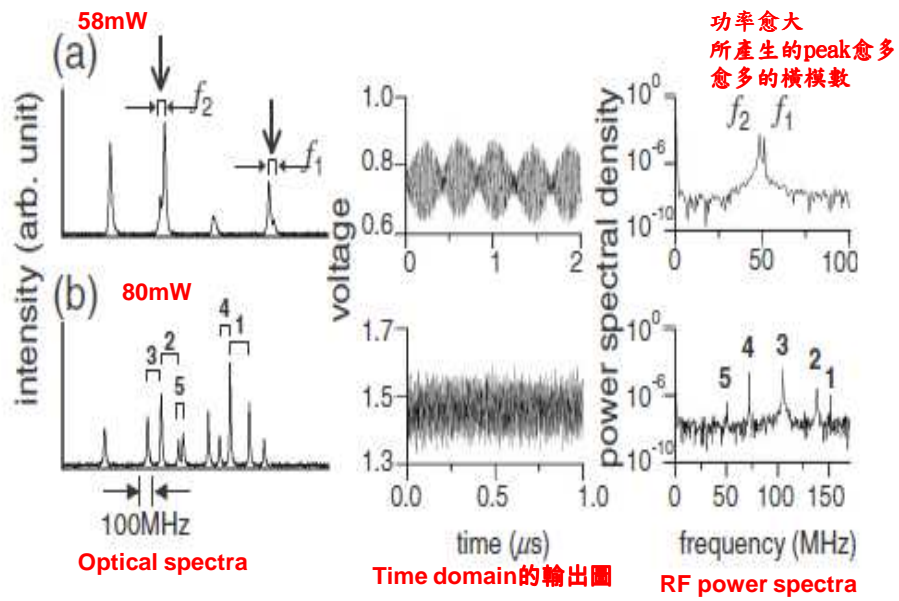


85 mW

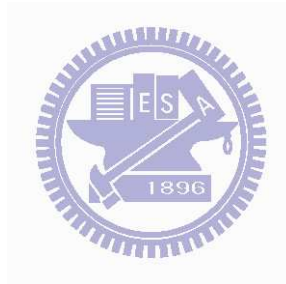


91 mW

圖 3-8 非對稱 end-pumping 多重橫模(multitransverse modes)圖案



3-9 在不同的激勵功率下 (a) 58 mW 和(b) 80 mW. 光學光譜，波形， 和所對應的射頻功率光譜



第四章 從混亂無序到類似周期性弛張振盪的實驗架構

4-1 背景說明

本實驗與 Kenju Otsuka[1]等人所做實驗不同在於；利用腔內各元件的腔長的不同；如雷射晶體長度、輸出耦合鏡厚度和雷射晶體與耦合輸出鏡間之距離長度。它們彼此間的相互的干涉影響，而造成雷射輸出形成混亂無序的雜訊。即是利用縱模間不同的相互影響，(因為腔長的變化可以影響縱模頻率的變化)，並運用切 wedge 的方式來破壞 etalon 效應，運用切 wedge 的方式將振盪腔內的雜訊頻率給抑制住，避免與其他共振腔內的頻率相互干擾，而造成混亂無序不平整的輸出。

使用摻釹釩酸鈮(Neodymium-doped Yttrium Orthovanadate)Nd:YVO₄雷射晶體當作增益介質，雷射二極體光束經由光纖傳輸，並將光束 pumping 到一端的 Nd:YVO₄雷射晶體上，為 end-pumping 的方式，亦能產生上述所描述的現象；產生混亂無序的振盪現象。但本實驗最主要的特色是；將這些所產生的混亂無序的信號頻率，再經由切角的輸出耦合鏡和切角的雷射晶體所組成的共振腔，將這些混亂無序的信號給濾除掉。而這切角的楔形雷射晶體和切角的楔形耦合輸出鏡，可破壞 etalon 效應，讓各元件內所產生的頻率不會互相干擾而產生雜訊。而最後獲得高速調制，類似周期性的振盪，甚至於有類似 mode-locked 的現象產生。切角的主要功用是將各元件共振腔內頻率給抑制住，使這些頻率不會與其他腔內頻率產生干擾，進而可獲得高速調

制(high-speed modulation)，和類似周期性的弛張振動(quasiperiodic relaxation oscillation)信號。

平-平輸出耦合鏡可當做一片 Fabry-perot etalon(標準具或選頻元件)，亦可當成頻率濾波器(frequency filter)，將其本身所產生的共振頻率 f_3 抑制住，不要與其他共振腔所產生的頻率相互干擾。

觀察實驗一的結果是獲得混亂無序(chaos)的信號後，可再藉由磨去一小角度的輸出耦合鏡和 Nd:YVO₄ 晶體所組成的共振腔，來改善雷射輸出信號，消除一些雜訊。繼續做實驗二，利用消去一小角度的差異的輸出耦合鏡，將腔內不要的雜訊頻率給抑制住，而不與其他共振腔的頻率給互相干擾。這片切楔子(wedge)的輸出耦合鏡(楔形輸出鏡)如一片選頻元件(etalon)，因為 etalon 可當成頻率濾波器(frequency filter)來使用。

為了進一步消除此輸出信號波動雜亂現象，繼續做實驗二。

一般認知，輸出的雷射光束應該是與時間軸平行的一橫線，即是俗稱 CW(continuous wave)連續波，用一般解析度的示波器(解析度 500Mz)量測雷射光輸出信號，確實是一橫線。由於實驗室新購一部性能佳且解析度高的示波器(解析度 40GHz)相當精良，並試著用新購置的儀器量測，結果輸出是相當出忽意料之外，螢幕顯示是一個波動且不平整的輸出信號(渾沌:chaos)，與一般認知有所差異。為了探討這動態現象並消除這波動不平整的渾沌信號現象，所以做此雷射腔內動態實驗，進一步了解波動信號產生的由來。其時沒有真正的 CW 雷射輸出，使用高解析度的示波器觀測，是一個波動不平整的 CW 信號。倘若觀測出信號是一個整齊且週期性振盪的輸出信號，則是 mode-locked 信號。

Chaos 的由來，是由耦合腔所造成，耦合腔結構如圖 4-2 所示，是由雷射晶體腔內所產生的共振頻率 f_1 、輸出耦合鏡厚度所形成的共振腔內所產生的頻率 f_3 、雷射晶體和輸出耦合鏡之間所形成的共振腔，產生的振動頻率 f_2 ，和在雷射晶體的 pumped 面與輸出耦合鏡面反射面間的腔長所產生的共振頻率 f_4 ，這些在共振腔內各光學元件所產生的反射、折射信號，彼此間互相干擾影響而產生。為了消除這些 chaos 雜訊，使用楔形的雷射晶體、和楔形的輸出耦合鏡所組成的共振腔來消除雜訊，最後達到雷射輸出成類似 mode-locked 的信號。

可以運用四種方式來消除反射頻率所造成的雜混亂；一、可使用磨去一小角度的楔形晶體。二、可使用磨去一小角度的楔形輸出鏡(OC)。三、可以使用布魯斯特角(Brewster angle)方式。四、將共振腔內的光學元件傾斜一個角度(tilt)，使光束遠離光軸。將光學元件磨去一個小角度，或傾斜一個角度，主要目的是破壞耦合共振腔的結構(coupled resonator structure)，使頻率不要互相干擾，而形成 chaos 狀態。本實驗將運用第一、和第二種方式來改善輸出雷射信號。四個實驗分組如表一所

	Nd:YVO4 Nd濃度	輸出耦合鏡
實驗一	0.5%	R=90%
實驗二	0.5%	R=90% 楔形OC
實驗三	0.3% 楔形晶體	R=90%
實驗四	0.3% 楔形晶體	R=90% 楔形OC

表一 實驗條件

實驗首先必須建立一個標準的共振腔架構，如圖 4-1 所示，由雷射晶體 Nd:YVO₄(摻釹的鈮酸鈮)和平行平面輸出耦合鏡組成一個 Fabry-Perot 共振腔，產生渾沌信號。實驗一的架構就是產生混亂無序不平整的信號的共振腔。使用 end-pumping 方式，激勵雷射晶體，使光子產生放大並振盪，最後產生雷射信號輸出，使用高解析度的示波器觀察其輸出信號，是一個不平整的信號。

Fabry-Perot 共振腔結構，如圖 4-1 所示。在 Nd:YVO₄ 雷射晶體左端平面(pumping 入射端)鍍上一層高反射膜(HR: High Reflection at 1064nm >99.8%)和一層高穿透膜(HT: High Transmission at 808nm)。而在另一端面鍍上一層抗反射膜(AR coating; antireflection coating at 1064nm)。在輸出耦合鏡的一端面鍍上一層反射率(reflectivity)在 90%(即 R=90)對 1064nm 波長的反射膜。當使用雷射二極體(laser diode)，輸出波長為 808nm，末端激勵(end-pumping)到雷射晶體(laser crystal)；亦即是用 808nm 波長的入射光源，末端激勵 Nd:YVO₄ 晶體，則光子會在雷射晶體共振腔內往返振盪，並經過雷射晶體將光放大，產生 f1 頻率。在平行平面輸出耦合鏡共振腔內產生 f3 頻率。在雷射晶體的另一端面與平行平面輸出耦合鏡間的腔長 L2 所形成的共振頻率 f2 及腔長 L4 產生共振頻率 f4。由於這四項頻率相互的影響，造成四個耦合共振腔形態，耦合腔示意圖如 4-2 所示，最後經輸出耦合鏡將雷射光射出，成為混亂無序的輸出信號。此時雷射輸出信號是一個非常不平整，且上下波動劇烈的輸出信號。

實驗二；使用 Nd:YVO₄ 雷射晶體和一片切 wedge 的輸出耦合鏡組成共振腔，觀察其輸出信號，是否能有整型的效果，改善其輸出信號。

實驗三；藉由使用切 wedge 的 Nd:YVO₄ 雷射晶體和一片平行平面輸出耦合鏡組成共振腔，觀察其輸出信號，是否能有效改善其輸出信號。

實驗四；使用切 wedge 的 Nd:YVO₄ 雷射晶體和切 wedge 的輸出耦合鏡

所組成共振腔，觀察其輸出信號，是否可以大大的改善其輸出。藉由這四個實驗，將混亂無序的輸出信號，漸漸的透過不同的光學元件組合，做信號整形而達到 relaxation oscillation 和 periodic oscillations 或甚至於可趨近於 mode-locked 的效果。

4-2 實驗一 標準架構（緊密式共振腔結構）

首先必須建立一個標準的共振腔架構，產生渾沌信號，以利於後續的實驗比較。實驗一的架構就是產生混亂無序不平整的輸出信號。使用 Nd:YVO₄(摻釹的鈮酸鈮)雷射晶體和一片平行平面輸出耦合鏡組成緊密式共振腔結構，如圖 4-3 所示，並觀察其輸出信號。

由實驗一量測並觀察得知，RF spectrum，如圖 4-4 所示，是一個上下波動的信號，而且沒有任何 peak 信號產生，表示它是一個 CW 信號。由圖 4-5 所示；在示波器的觀察下，time domain 的輸出信號，散亂又不平整；水平刻度 20ns/div。圖 4-6 所示；輸出信號散亂又不平整；水平刻度 0.5ns/div(500ps/div)(水平刻度不同)。圖 4-7 所示是波長與輸出光強度圖。圖 4-8 所示是入射功率與平均輸出功率圖，由圖得知 threshold power 約在 400mW。

實驗一最主要目的是在產生一混亂無序的輸出信號，做為一個標準組，再與實驗二、三、四組做比較，以觀察四組實驗的結果。實驗二、三、四組是藉由更換不同的光學元件：如切 wedge 的輸出耦合鏡 OC(output coupler)，

和切 wedge 的晶體，以觀察不同的光學元件組合，不同的 time domain 輸出信號。

4-3 實驗二 輸出耦合鏡切 wedge 0.2° 的架構

由於實驗一的結果得知，輸出是一個上下波動的混亂信號。為了要消除這些混亂的雜訊，將平行平面輸出耦合鏡更換成有切 wedge 的輸出耦合鏡，藉由這片有切 wedge 的輸出耦合鏡，抑制了 etalon 效應，使得在輸出耦合鏡內所產生的共振頻率，被抑制住而不會和其他共振腔所產生的頻率相互作用，而減少其雜訊的輸出，進而改善輸出信號。實驗二架構如圖 4-9 所示。將緊密式共振腔稍加修改，耦合輸出鏡改換成切 wedge 0.2° 的輸出耦合鏡。設計將 OC(output coupler)改換成有切 wedge 的輸出耦合鏡，目的在將 L3 輸出耦合鏡內所產生的共振頻率 f_3 給抑制住在腔內，使在 L3 輸出耦合鏡產生之共振頻率 f_3 不與 f_1 、 f_2 、 f_4 三種頻率相互干涉，應可改善些輸出的雷射信號，使其消除些雜訊，而得到較平整的輸出信號。

實驗二結果顯示，如圖 4-10 所示，RF spectrum，在 frequency domain 上有一個 peak 產生(在 7.2GHz)，表示在 time domain 上有一個重複率產生。再用示波器觀察可獲得如圖 4-11、4-12 所示，在 time domain 上振盪輸出圖形。

圖 4-11 所示，置換 OC 為 R=90 有切 wedged 0.2° ：horizontal scale

20ns/div。圖 4-12 所示，horizontal scale 500ps/div。由圖 4-12 可以清楚的觀察到，在 time domain 上有一個比較規則性的周期振盪，

圖 4-13 為波長與輸出光強度圖。圖 4-14 所示，是入射功率與平均輸出功率圖，由圖得知 threshold power 也約在 400mW。

結論：實驗二的圖 4-11 和 4-12 顯示結果，與實驗一的圖 4-5、圖 4-6 比較，在 time domain 上明顯不同，有切 wedge 的輸出鏡，與沒切 wedge 的輸出鏡，有明顯的差異，差異在 time domain 上的振盪波形。

使用晶體 Nd:YVO₄(沒切結 edge)，和切 wedge 0.2° 的輸出耦合鏡，雷射信號輸出(在 time domain 上)有明顯的改變。

為了獲致較大幅度的改善輸出信號，繼續做第三個實驗：實驗三。使用切 wedge 的 Nd:YVO₄ 雷射晶體，藉由切 wedge 的雷射晶體能抑制 etalon 效應，並破壞耦合腔效應(coupled cavity effect)，使在切 wedge 的雷射晶體內所產生的共振頻率 f1，不會與 f2、f3、f4 等頻率相干擾，而使得輸出信號較平整些。

4-4 實驗三 切 wedge 的雷射晶體架構

將增益介質(雷射晶體 Nd:YVO₄)置換成有切 wedge 的雷射晶體 Nd:YVO₄，切角為 0.5°，而使用無切 wedge 的輸出耦合鏡，此輸出鏡之反射率 R=90。藉由切 wedge 的雷射晶體，將 L1 腔內之雜訊頻率給濾除，避免跟 L2 腔長產

生之頻率 f_2 、L3 產生之頻率 f_3 和 L4 腔長產生之頻率 f_4 ，三個腔長內之頻率相互干擾。並觀察輸出信號。

實驗三架構如圖 4-15 所示，藉由消去一個小角的雷射晶體，將抑制住 f_1 的頻率，使 f_1 不會與 f_2 、 f_3 、 f_4 相互干擾，進而大幅改善雷射輸出信號，獲致較佳之輸出信號。如圖 4-16 所示，RF spectrum，在 frequency domain 上有一個 peak 產生(在 7.2GHz)，表示在 time domain 上有一個重複率產生。再用示波器觀察可獲得如圖 4-17、4-18 所示，在 time domain 上振盪輸出圖形。圖 4-17 所示，置換 OC 為 R=90 有切 wedged 0.2° ：horizontal scale 20ns/div。圖 4-18 所示，horizontal scale 500ps/div。由圖 4-18 可以清楚的觀察到，在 time domain 上有一個比較規則性的類似正弦波周期振盪。

在實驗一中，由於輸出鏡沒有切角，增益介質亦沒有切角，則輸出信號是很亂不平整。為了獲得一個較佳的輸出信號，將雷射晶體磨去一角為 0.5° ，輸出鏡為 flat output coupler R=90 折射率為 90%。

實驗三結果如預期。輸出信號大幅改善，且有類似正弦波的信號產生，輸出信號如圖 4-18 所示。圖 4-19 為波長與輸出光強度圖。圖 4-20 所示，是入射功率與平均輸出功率圖，由圖得知 threshold power 也約在 400mW。

此實驗三的結果如預期吻合，可以大幅改善輸出信號。與實驗一圖 4-5、圖 4-6 相比較，明顯改善許多，信號是呈現正弦波圖形。

最後，為了獲得更好的輸出信號，將雷射晶體切去一小角，和輸出耦合

鏡也切去一小角，組成共振腔以便達到更佳輸出效果。實驗四，藉由更換有切 wedge 的雷射晶體和有切 wedge 的輸出耦合鏡來達到大幅改善輸出信號的功能。

4-5 實驗四 切 wedge 的雷射晶體 Nd:YVO₄和切 wedge 的輸出耦合鏡的架構

由實驗三觀之，雷射晶體切 wedge 時，有明顯改善輸出信號的效果。實驗二；輸出耦合鏡(output coupler)切 wedge 時，輸出信號也有改善。基於此概念，在做實驗四時，將增益介質切 wedge 及將輸出鏡切 wedge，如此應可獲得更佳的輸出結果。

由切 wedge 的雷射晶體和切 wedge 的輸出耦合鏡組成共振腔，實驗四的架構如圖 4-21 所示。藉由磨去一小角的增益介質，抑制 f1 雜訊。和藉由磨去一小角的輸出鏡，抑制 f3 雜訊。如此 f1 和 f3 頻率被消除不會與 f2、f4 相互干擾，而產生更多雜訊。如此雷射輸出可大幅改善，甚至於有 mode-licked 的現象產生。

如圖 4-22 所示，RF spectrum，在 frequency domain 上有兩個 peak 產生(在 3.7GHz 和 7.4GHz)，表示在 time domain 上有兩個重複率產生。再用示波器觀察可獲得如圖 4-23、4-24 所示，在 time domain 上振盪輸出圖形，且相位被鎖定，故有 mode locked 的圖形輸出。圖 4-23 所示，置換 OC 為 R=90 有切 wedged 0.2°：horizontal scale 20ns/div。圖 4-24 所示，

horizontal scale 500ps/div 。由圖 4-24 可以清楚的觀察到，在 time domain 上有一個相當規則性的鎖模振盪輸出。圖 4-25 為波長與輸出光強度圖。圖 4-26 所示，是入射功率與平均輸出功率圖，由圖得知 threshold power 約在 400mW 。

將實驗一、二、三、四的 RF spectra 結果作一比較，如圖 4-27 所示，有切 wedge 的實驗組(實驗二、三、四組)，在 frequency domain 上都有 peak 產生，表示在 time domain 上一定有重複率產生，也就是有規則性的振盪輸出。四組實驗的 time domain 的動態圖形，有切 wedge 的實驗組(實驗二、三、四組)，如圖 4-28 所示，表示在 time domain 上一定有重複率產生，也就是有規則性的振盪輸出。



由實驗四得知，藉由切 wedge 的雷射光輸出的的共振頻率 f_1 ，和切 wedge 的輸出耦合鏡的共振頻率 f_3 ，這兩個頻率都被抑制住，故 f_1 、 f_3 頻率不會與 f_2 、 f_4 相互干擾，所以輸出信號是非常有規則；如高速調制，類似周期性的振盪，是鎖模(mode-locked)的現象。

此實驗做出的結果與預期的結果相吻合。利用實驗四的架構，雷射晶體切一小角與輸出耦合鏡切一小角，將會大大改變輸出信號。而輸出信號是趨近於完美的 mode-locked 的形態輸出。

結論

Otsuka 使用一個元件 Nd:YAG 陶瓷晶體當做增益介質，亦當作一個共振

腔，使用 end-pumping，可以在輸出端得到類似周期性的和雜亂無序的弛張振盪，如圖 4-29(左)所示。但是輸出振盪頻率是比較低些，約在數 10KHz 間。但實驗四，由切 wedge 的增益介質和切 wedge 的輸出鏡所組成的共振腔，其最後輸出所呈現的振盪頻率約數 10MHz，如圖 4-29(右)所示，明顯與 Otsuka 實驗高出許多。由圖 4-29 所示，Otsuka 的輸出水平刻度較大許多。

以微晶片(microchip)做為共振腔，因為腔長太短，容易產生熱透鏡效應(thermal lens effect)，進而產生高階多重橫模振盪，並且無法在微晶片晶體內放入其他光學元件(如倍頻晶體、Q 開關等)，而造成應用上的限制。

Nd:YVO₄ 晶體與輸出耦合鏡組成的共振腔，其雷射信號輸出品質較用燒結法製成的 Nd:YAG 陶瓷晶體好很多。Nd:YAG 陶瓷晶體輸出信號可達到 quasiperiodic and pulsation relaxation oscillation 狀態。但使用切 wedge 的晶體(Nd:YVO₄)晶體和切 wedge 的 OC，更可以達到 mode-locked 的效果。

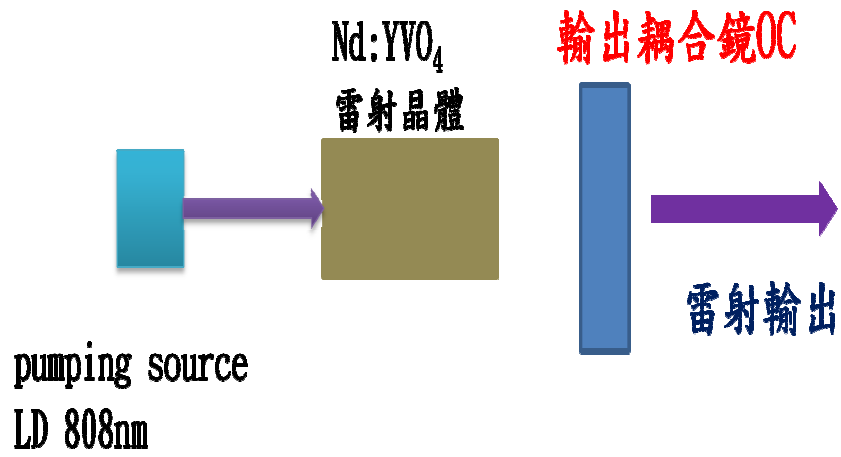


圖 4-1 緊密式共振腔示意圖

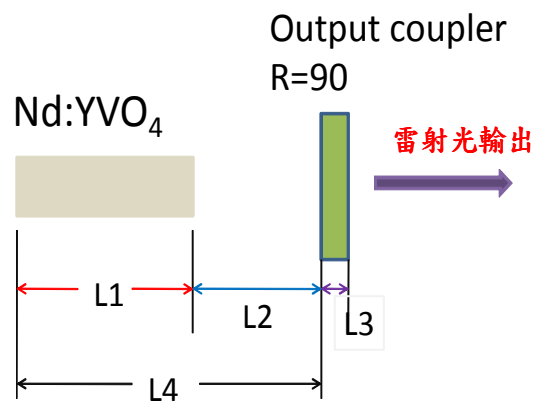


圖4-2 產生耦合共振腔
受四種不同共振頻率的影響

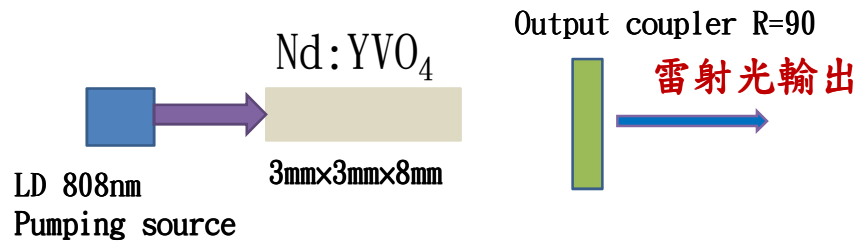


圖4-3 實驗一 緊密式共振腔

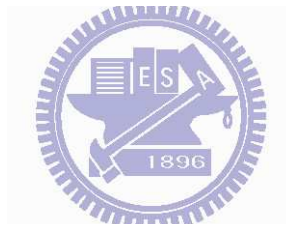


圖4-4 實驗一 RF spectrum time domain上
無peak產生 表示沒有任何重複率存在

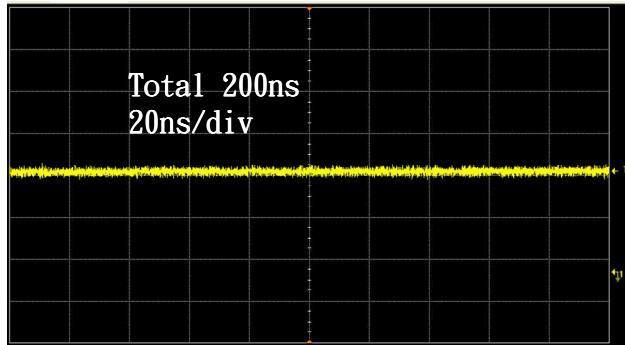


圖4-5 實驗一 Fabry-perot 共振腔 輸出訊號
 0.5%Nd:YVO₄ R=90% OC都沒切wedge X軸 20ns/div

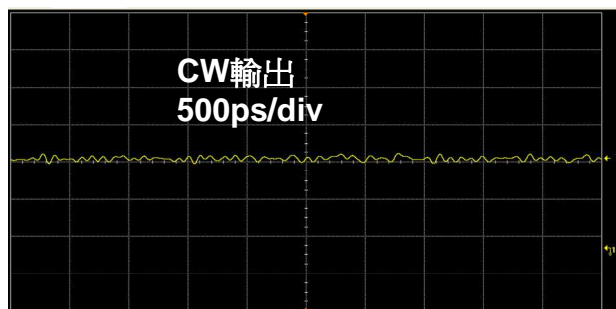
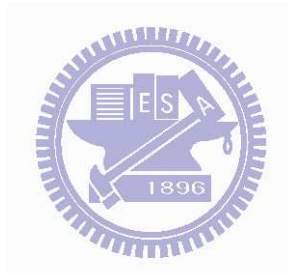


圖4-6 實驗一 Fabry-perot 共振腔 CW輸出訊號
 0.5%Nd:YVO₄ R=90% OC都沒切wedge 500ps/div

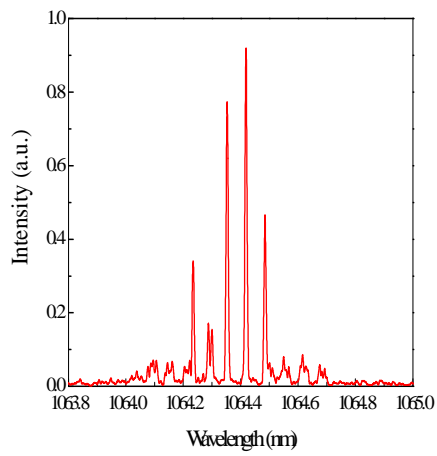
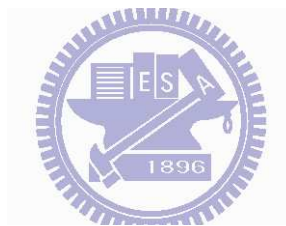


圖4-7 實驗一 波長與輸出光強度圖



2DGraph1

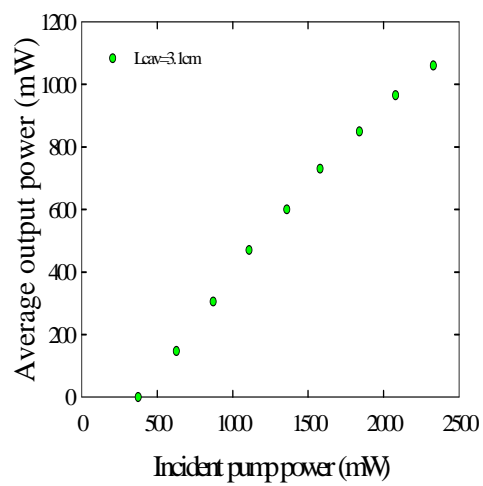


圖4-8 實驗一 入射功率與平均輸出功率圖

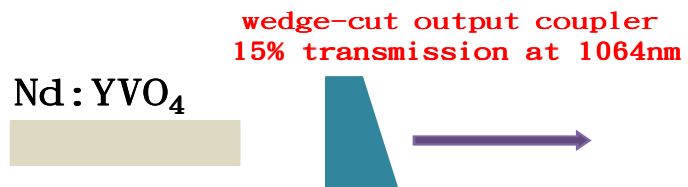


圖4-9 實驗二結構圖
置換output coupler為R=90 有切 wedged 0.2°

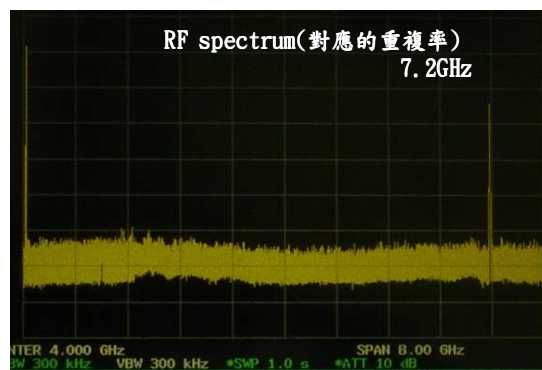


圖4-10 RF spectrum frequency domain上有peak產生，表示在time domain上有重複率存在

0.5%Nd:YVO₄
R=90%用楔型OC

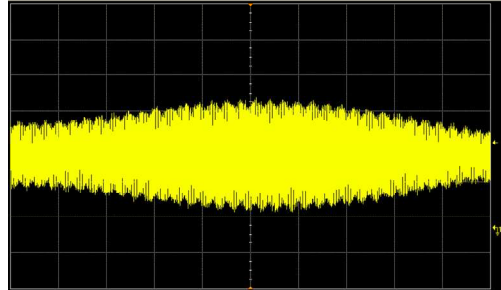


圖4-11 實驗二 置換output coupler為R=90有切wedge 0.2° 20ns/div

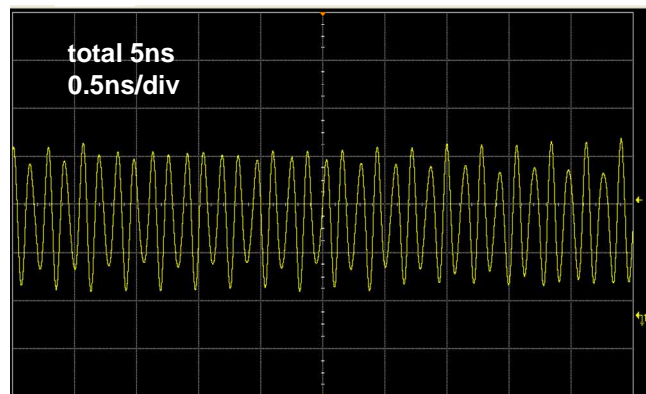


圖4-12 實驗二 time domain dynamic圖 500ps/div

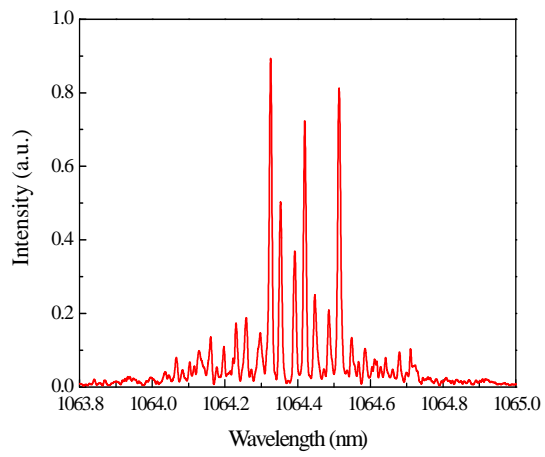


圖4-13 實驗二 波長與輸出光強度圖



2D Graph 1

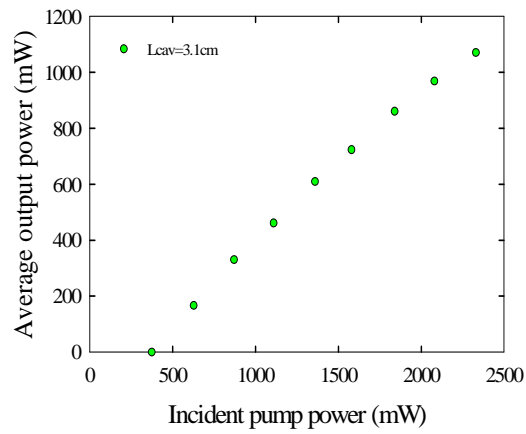


圖4-14 入射功率與平均輸出功率圖

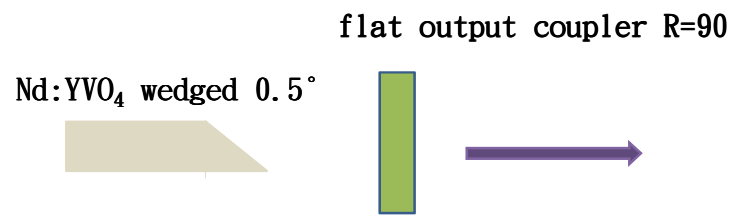


圖4-15 實驗三 架構圖置換Gain medium為有wedge-cut 0.5° flat output coupler R=90

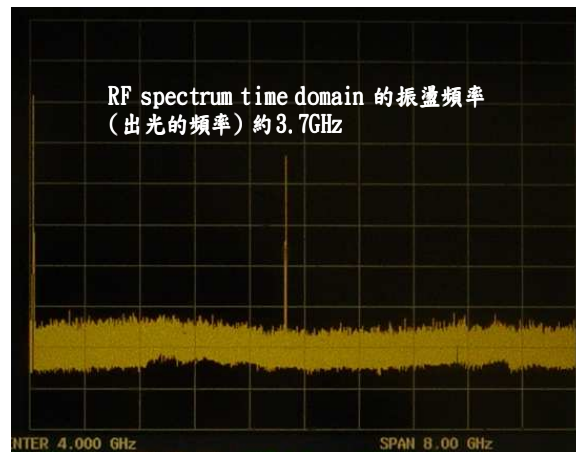
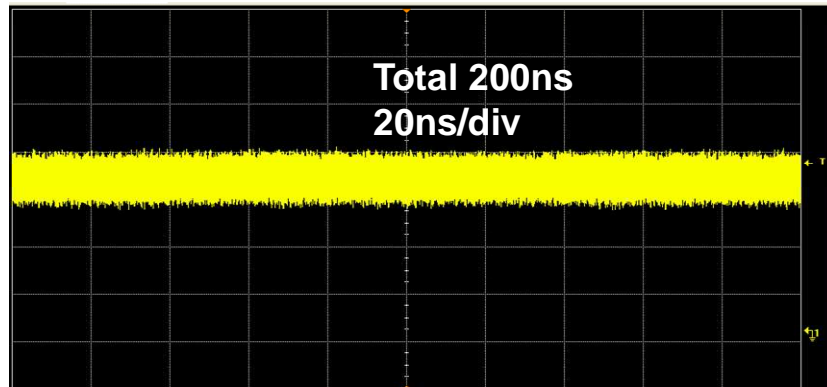


圖4-16 RF spectrum time domain上
有一個peak產生，表示有重複率存在



0.3%NdYVO₄ 用楔型雷射晶體
用平行平面R=90%OC

圖4-17 實驗三 置換Gain medium為有wedge-cut 0.5° flat output coupler R=90 20ns/div

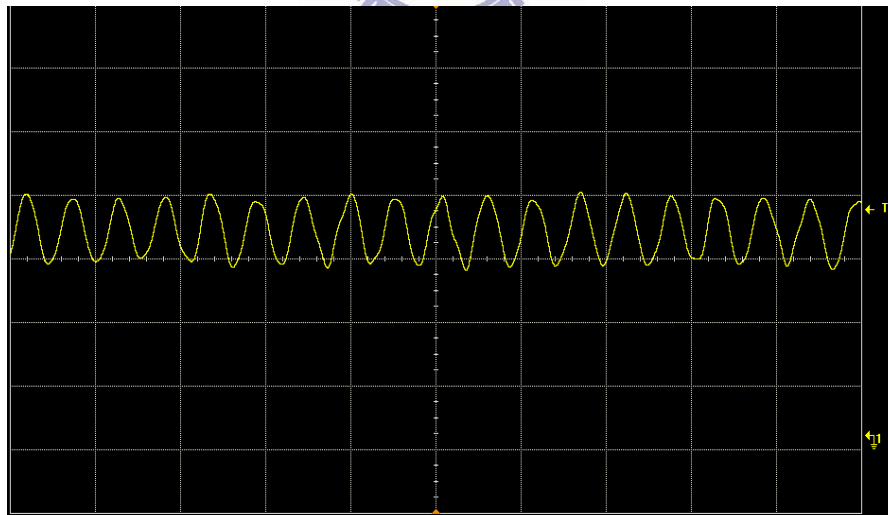


圖 4-18 實驗三 置換 Gain medium 為有 wedge-cut flat output coupler R=90 0.5ns/div

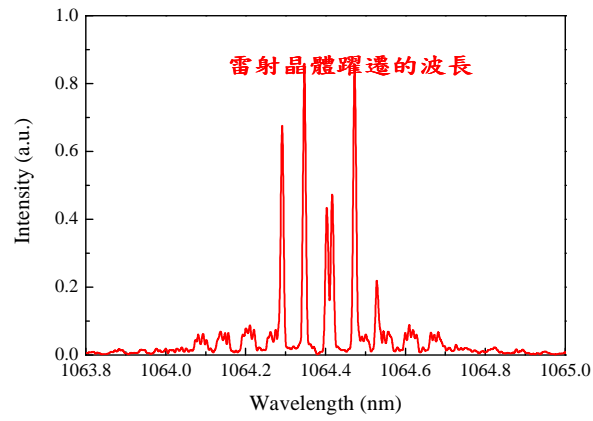


圖4-19 實驗三 波長與輸出光強度圖

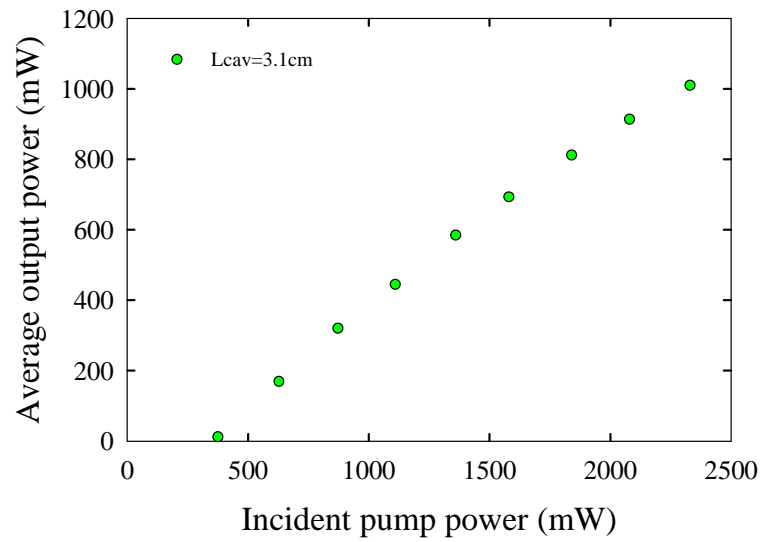
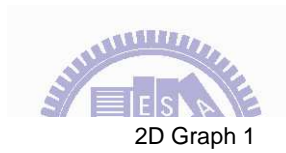


圖 4-20 實驗三 入射功率與平均輸出功率圖

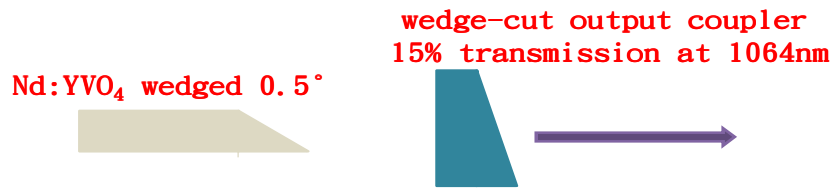


圖4-21 實驗四 架構圖 Gain medium為有切wedge 0.5°
及 wedge-cut output coupler為R=90

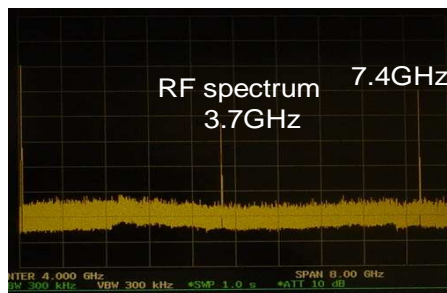


圖4-22 實驗四 RF spectrum time domain上有
兩個peak產生 表示有兩個重複率存在

0.3%NdYVO₄ 用楔型晶體
R=90%用楔型OC

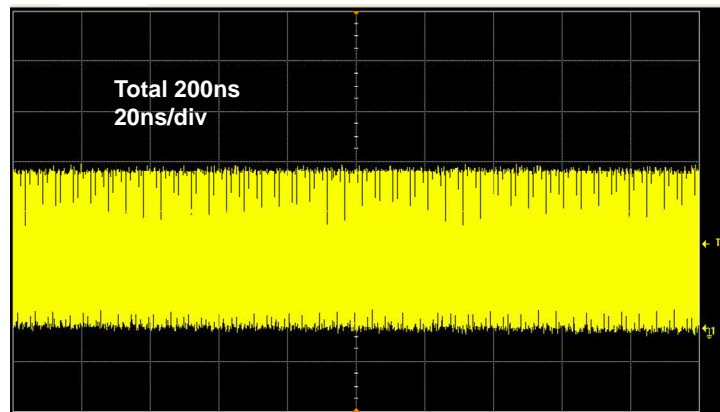
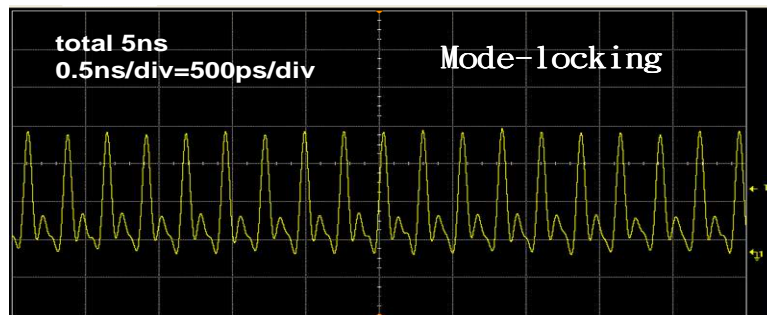


圖4-23 實驗四 Gain medium為有切wedge 0.5°
及 wedge-cut output coupler為R=90 20ns/div



0.3%NdYVO₄ 用楔型晶體
R=90%用楔型OC

圖4-24 實驗四量測結果，是mode-locking輸出 500ps/div

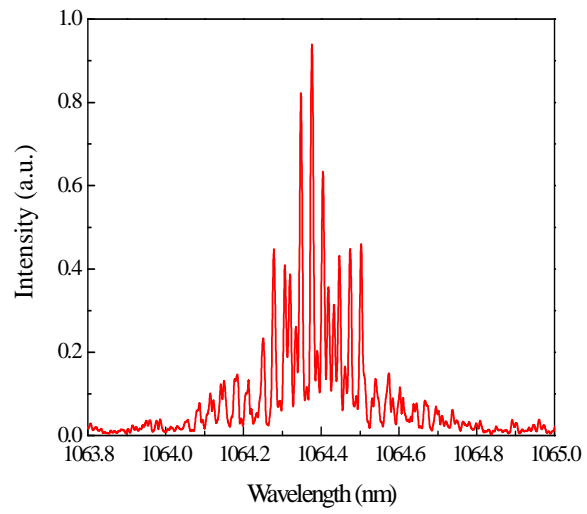
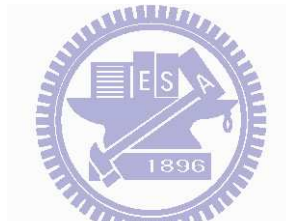


圖4-25 實驗四 波長與輸出光強度圖



2D Graph 1

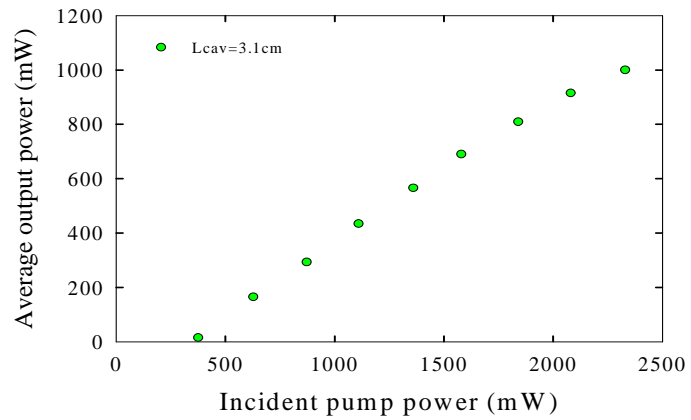


圖 4-26 入射功率與平均輸出功率圖

四個實驗的 RF spectrum

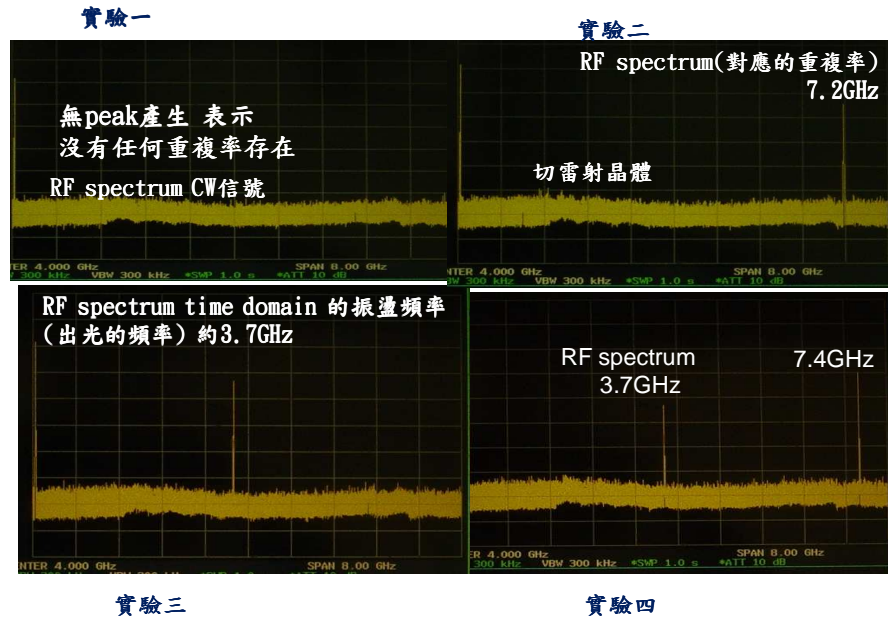


圖 4-27 實驗一、二、三、四的 RF spectra 的輸出比較

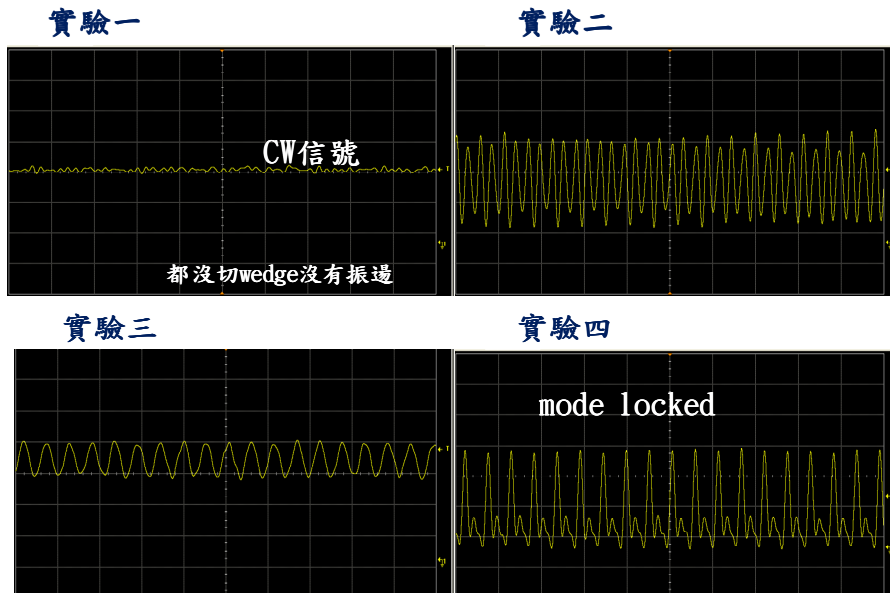
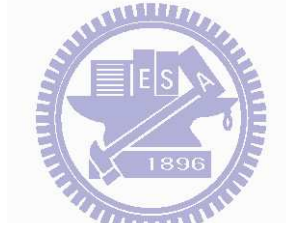
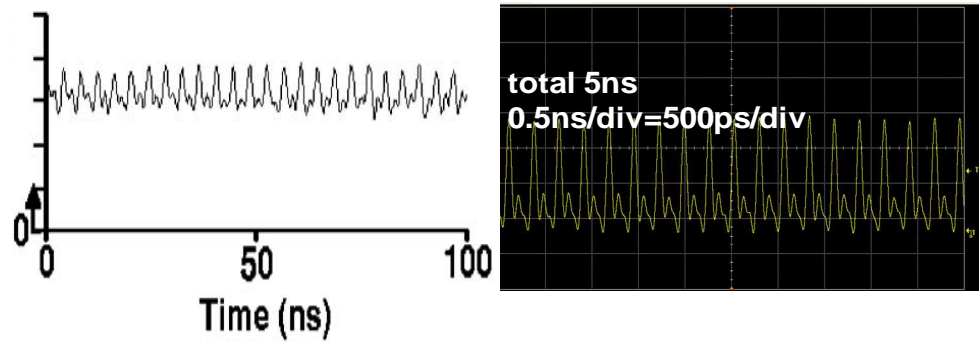


圖4-28 實驗一、二、三、四的time domain輸出比較



Otsuka的實驗
relaxation的狀態輸出
nano second等級

實驗四 Mode-locking輸出
pico second等級

圖4-29 Nd:YAG ceramic晶體輸出與實驗四輸出之
比較(輸出的時間刻度不同)



第五章 結論與未來展望

5.1 結論

由實驗的結果得到 0.5% Nd:YVO₄ 是一個品質非常好的雷射晶體(增益介質)，對 808nm 的光束有良好的吸收係數。利用一雷射晶體 Nd:YVO₄ 搭配一平行平面輸出耦合鏡所組成的共振腔，可獲得一個混亂無序的輸出信號。再藉由更換有切角的楔形雷射晶體和切角的楔形輸出耦合鏡所組成的共振腔，亦可獲得類似 mode-locked 效果。

使用緊密式共振腔的特徵是，腔長增長，以確保能在單橫模(TEM₀₀)下運作，並觀察在多重縱模下的各種輸出圖案。其次是使用緊密式共振腔的結構，能產生 coupled cavity 效應，產生輸出動態現象。並藉由更換光學元件：楔形雷射晶體和楔形輸出耦合鏡，來破壞腔內 etalon 效應，進而產生振盪，獲得不同輸出振盪圖形，如圖 4-27 所示，四種動態圖形的比較。

經由上述四個實驗，和 Otsuka 的實驗均能獲得 pulsation oscillation 的雷射輸出。都是運用 LD 雷射二極體 end-pumping 的方式；打在薄片式 Nd:YAG ceramic 和 Nd:YVO₄ 雷射晶體上，並獲得動態效應(dynamic effects)，如高速調制 (high-speed modulation) and 類似周期的調制 (quasi-periodic modulations) 等效應。由 Otsuka 團隊所做的實驗與實驗

四 time domain 比較得知,如圖 4-29 和圖 4-30 所示,Otsuka 團隊實驗結果,得知有較低的弛張振動(relaxation oscillation)頻率,範圍大約在 KHz 等級。而本實驗量測得較高範圍的弛張振動頻率,範圍可達到 MHz 或 GHz 等級。

經由適當的切角方式(楔形雷射晶體和楔形輸出耦合鏡),所組成的雷射共振器作適當的設計和組合,可獲得更好的 mode-locked 信號。

5.2 未來展望

再進一步可以探討實驗,一、可使用平平輸入鏡和平凹輸出鏡所組成的平凹共振腔,並在腔內置入一片可飽和吸收體(saturable absorber),如此一來就可得到一非常完整的鎖模信號。二、可運用 microchip cavity 的觀念,將晶體兩端面鍍膜,但雷射晶體增長,觀察是否也能產生 pulsations 或 spiking 的振盪輸出。三、也可以固定腔長,移動腔內晶體位置,觀察其輸出變化情形。

參 考 文 獻

- [1] Kenju Otsuka, Chi-Ching Lin and Jing-Yuan Ko, Shu-Chun Chu,
“Nonlinear dynamics in thin-slice Nd:YAG ceramic lasers: Coupled
local-mode laser model” , APPLIED PHYSICS LETTERS
89, 081117(2006)
- [2] Kenju Otsuka, Jing-Yuan Ko “Modal Interference and Dynamical
Instability in a Solid-State Slice Laser with Asymmetric
End-Pumping” , PHYSICAL REVIEW LETTER 19 AUGUST 2002
- [3] Tatsuro NARITA, Yoshihiko MIYASAKA and Kenju OTSUKA
“Self-Induced Instabilities in Nd:Y3Al5O12 Ceramic Lasers.”
Japanese Journal of Applied Physics Vol. 44 No. 37. 2005. pp.
L1168-L1170(2005)
- [4] 楊國輝 黃宏彥編著 ” 雷射原理與量測概論” 五南圖書出版
- [5] Keln J. Kuhn “LASER ENGINEERING” Prentice-Hall, Inc.(1998)
- [6] William T. Silfvast “LASER FUNDAMENTALS” second edition
CAMBRIDGE (2003)
- [7] 丁勝懋編著 ” 雷射工程導論” 中央圖書出版社